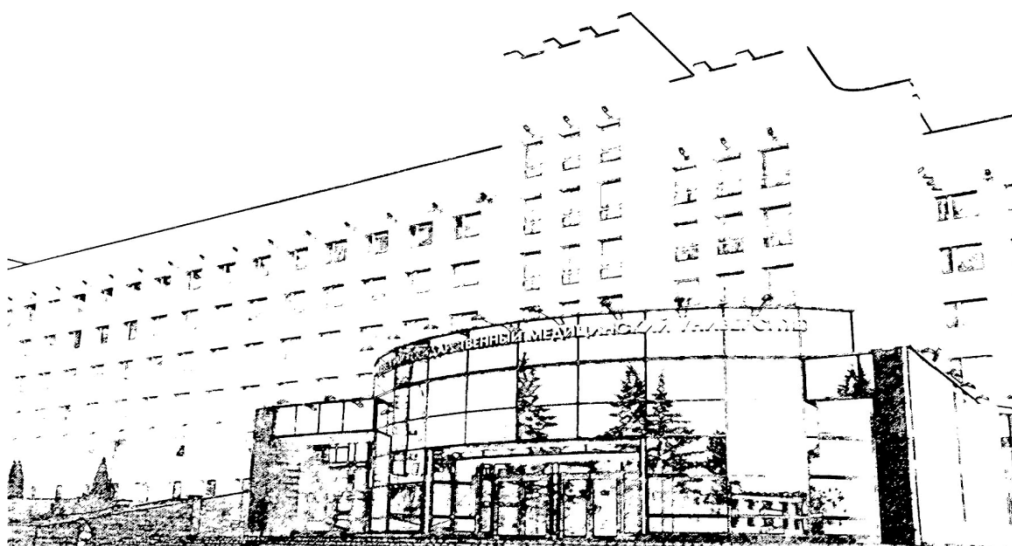


# РАДИАЦИОННАЯ МЕДИЦИНА

Часть I



Витебск, 2018

**МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**  
**УО «ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОРДЕНА ДРУЖБЫ НАРОДОВ**  
**МЕДИЦИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



# **РАДИАЦИОННАЯ МЕДИЦИНА**

**Часть I**

Рекомендовано Учебно-методическим объединением  
по медицинскому образованию Республики Беларусь  
в качестве пособия для студентов  
учреждений высшего образования, обучающихся  
по специальности 1-79 01 01 «Лечебное дело»

Витебск  
2018

УДК 614.876 (07)  
ББК 51.26 Я 73  
Б 91

Рецензенты:

Кафедра общей гигиены и экологии с курсом радиационной медицины  
УО «Гомельский государственный медицинский университет» (заведующий  
кафедрой кандидат медицинских наук, доцент, В.Н. Бортновский)

Доцент кафедры анатомии и физиологии УО «Витебский государственный  
университет имени П.М. Машерова» кандидат биологических наук, доцент,  
М.А. Щербакова

**Бурак, И.И.**

Б 91 Радиационная медицина: пособие. В 2 ч. Ч. 1 / И.И. Бурак, О.А.  
Черкасова, С.В. Григорьева, Н.И. Миклис. – Витебск: ВГМУ, 2018. –  
206 с.

**ISBN 978-985-466-733-1**

Пособие по радиационной медицине для студентов высших  
медицинских учреждений образования написано в соответствии с типовой  
программой, утвержденной Министерством Здравоохранения Республики  
Беларусь.

Пособие предназначается студентам лечебного факультета для  
подготовки к лекционным и лабораторным занятиям, а также будет  
полезно студентам стоматологического факультета, слушателям  
факультета повышения квалификации, врачам рентгенологам, радиологам  
и врачам общей практики.

Утверждено и рекомендовано к изданию Центральным учебно-  
методическим Советом УО «ВГМУ» 17.09.2014 г., протокол № 7.

УДК 614.876 (07)  
ББК 51.26я73

**ISBN 978-985-466-733-1**

© Бурак И.И., Черкасова О.А.,  
Григорьева С.В., Миклис Н.И., 2018  
© УО «Витебский государственный  
медицинский университет», 2018

## ПРЕДИСЛОВИЕ

На современном этапе развития общества применение новых технологий, в том числе и в медицине, связано с возрастающим использованием источников ионизирующего излучения и, соответственно, с увеличением риска облучения персонала и населения, что и обуславливает значимость радиационной медицины для широкого круга специалистов. Главная цель преподавания радиационной медицины - побудить студентов к пониманию взаимосвязи между первичными повреждающими механизмами действия ионизирующей радиации и формированием ближайших и отдаленных последствий, а также способов предупреждения и снижения таких эффектов.

Пособие включает четыре теоретические главы: введение в радиационную медицину, этиологию лучевой патологии, патогенез, характеристику лучевой болезни, радиационную безопасность и медицинскую. Особое внимание в пособии уделено вопросам обеспечения и контроля радиационной безопасности, а также медицинской и индивидуальной профилактике.

Пособие составлено с учетом рекомендуемой типовой учебной программой литературы, последних достижений науки и практики. При написании пособия использованы материалы принятых в Республике Беларусь Законов и нормативных правовых актов по радиационной безопасности. Такое сочетание основных теоретических положений радиационной медицины с правовыми документами будет способствовать формированию у будущих врачей прочных знаний и умений по радиационной медицине и успешному применению их в практической работе.

Пособие предназначено для студентов медицинских ВУЗов, изучающих радиационную медицину, а также может быть полезно для врачей и слушателей ФПК.

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры и лично заведующему кафедрой общей гигиены и экологии с курсом радиационной медицины Гомельского государственного медицинского университета, доценту В.Н. Бортновскому, а также доценту кафедры анатомии и физиологии Витебского государственного университета имени П.М. Машерова М.А. Щербаковой за проделанную работу по рецензированию пособия и с благодарностью примут все критические замечания и предложения от читателей.



## ГЛАВА 1

### ВВЕДЕНИЕ В РАДИАЦИОННУЮ МЕДИЦИНУ

#### Излучения и их значение

Организм человека как открытая, саморегулирующаяся система, испытывающая потребность в притоке вещества, энергии и информации и полностью зависящая от среды, подчиняется основному экологическому закону *Рулье-Сеченова*: результаты развития любого организма определяются соотношением его внутренних особенностей и особенностей той среды, в которой он находится.

На человека в среде его обитания могут воздействовать и вызывать средовые болезни экологические абиотические физические факторы, среди которых выделены излучения (перенос энергии через пространство в форме электромагнитных волн либо субатомных частиц).

К электромагнитным **волновым** относят рентгеновское, гамма- ( $\gamma$ -), ультрафиолетовое, видимое, инфракрасное, радиочастотное излучения, а также излучения, сопровождающие электричество (радиочастотное, микроволновое и ультравысокой частоты) (таблица 1.1).

**Таблица 1.1** – Виды волновых излучений

Вид излучения	Длина волны
Рентгеновское и $\gamma$ -	$10^{-14}$ - $10^{-9}$ м
Ультрафиолетовое	$10^{-8}$ - $10^{-7}$ м (10-400 нм)
Видимое	$10^{-6}$ м (400-700 нм)
Инфракрасное	$10^{-6}$ - $10^{-3}$ м (0,740-1000 мкм)
Радиочастотное	$10^{-3}$ - $10^4$ м
Сопровождающие электричество	$10^5$ - $10^8$ м

Волновые излучения находят применение в промышленной рентгенографии и лучевой терапии ( $10^{-14}$ - $10^{-13}$  м), медицинской рентгенографии ( $10^{-12}$ - $10^{-10}$  м), фотографии ( $10^{-6}$ - $10^{-3}$  м), на телевидении ( $10^{-1}$ - $10^0$  м), радио ( $10^1$ - $10^4$  м), радарх ( $10^{-3}$ - $10^{-2}$  м).

К **субатомным** (корпускулярным) относят альфа- ( $\alpha$ -), бета- ( $\beta$ -), нейтроны, протоны, дейтроны, нейтрино, мезоны и другие частицы (таблица 1.2).

**Таблица 1.2** – Характеристика субатомных частиц

Виды частиц	Масса	Заряд
Альфа, $\alpha$	4 а.е.м.	+2
Бета, $\beta$ , электроны	$5,486 \times 10^{-4}$ а.е.м.	-1
Бета, $\beta$ , позитроны	$5,486 \times 10^{-4}$ а.е.м.	+1
Нейтроны, n	1 а.е.м.	0
Протоны, p	1 а.е.м.	+1
Дейтроны	2,01423 а.е.м.	1
Нейтрино	0 а.е.м.	0
Мезоны, $\mu^+$ , $\mu^-$	206,8 э.е.м.	+1, -1
$\pi^+$ , $\pi^-$	273,1 э.е.м.	+1, -1
$\pi^0$	264,1 э.е.м.	0

В настоящее время наиболее изучены  $\alpha$ - и  $\beta$ -частицы, протоны, нейтроны.

Субатомные излучения применяют в промышленности и сельском хозяйстве. В медицине для лечения онкологических заболеваний  $\beta$ -электронами используют бетатроны, протонами – синхроциклотроны, нейтронами – ускорители нейтронов.

Электромагнитные волновые излучения подразделяют на *неионизирующие* и *ионизирующие*. Неионизирующие излучения включают оптические (ультрафиолетовые, видимые, инфракрасные) излучения и электромагнитные (микроволновые, радиочастотные, сверхнизкой и сверхвысокой частоты) поля, к ионизирующим волновым относят  $\gamma$ - и рентгеновское излучения (рисунок 1.1). Они также называются квантовыми или фотонными.

С целью измерения энергии элементарных частиц и электромагнитных излучений в ядерной физике применяются традиционная единица – электрон-вольт (эВ) и системная – Джоуль (Дж). Кинетическая энергия, приобретаемая частицей с элементарным электрическим зарядом, проходящей через электрическое поле с разностью потенциалов 1 В равна 1 эВ.

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

Все излучения подчиняются одним и тем же физическим законам и могут быть охарактеризованы по длине волны и частоте. *Длина волны* зависит от среды пропускания и используется для описания оптических излучений, *частота* – для описания полей с чрезвычайно низкой частотой, радиочастотного и микроволнового излучения.

Неионизирующие излучения обладают энергией ниже 34 эВ, ионизирующие – равной и выше 34 эВ. Ионизирующие излучения вызывают **ионизацию** вещества, под которой понимают отрыв электрона от атома или молекулы, в результате которого они трансформируются в положительно заряженные ионы. Если энергии излучения недостаточно для полного отрыва электрона, то происходит **возбуждение** и переход электрона на удаленную от ядра орбиталь. Ионизация вещества обусловлена высокой энергией ионизирующих излучений, превосходящей энергию внутриатомных, внутримолекулярных и межмолекулярных связей.



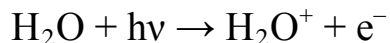
Рисунок 1.1. Виды волновых излучений

Ионизирующее излучение, в отличие от других экологических факторов, при воздействии на организм не имеет порога действия, причем малые дозы могут оказывать положительное влияние на организм, а низкие, средние и высокие – вредное и опасное действие. Ионизирующие излучения в зависимости от дозы могут быть причинными этиологическими факторами, непосредственно вызывая детерминированные лучевые поражения, или факторами риска, увеличивающими вероятность возникновения сомато-стохастической патологии независимо от величины дозы.

### Происхождение ионизирующих излучений

Возникновение ионизирующих излучений обусловлено радиоактивным распадом нестабильных ядер изотопов различных элементов, ядерными превращениями в космических телах и электрофизических установках, торможением в веществе заряженных частиц.

Ионизирующая радиация способна создавать разнозаряженные ионы при взаимодействии с атомами и молекулами среды. Например, излучение отрывает электрон с электронной оболочки молекулы воды:



В результате соединения противоположно заряженных ионов под действием электростатических сил образуются ионизированные атомы, которые существуют доли секунды. В этот период ионизированные атомы инициируют патологические реакции, которые могут привести к гибели организма.

Самопроизвольное превращение одних элементов в другие со стабилизацией ядер и выделением избыточной энергии в виде испускания корпускулярных либо квантовых ионизирующих излучений определенного вида называют **радиоактивностью**.

Радиоактивные превращения различны по способу выделения избыточной энергии либо в виде  $\alpha$ - или  $\beta$ -частиц определенной энергии, либо фотонов, времени протекания, вероятности распада нестабильных ядер в единицу времени.

Распад ядер радиоактивных веществ происходит в соответствии со статистическими законами (так как время распада нестабильного ядра предугадать невозможно) и характеризуется постоянной распада – константой  $\lambda$ . За единицу времени в среднем распадается  $\lambda N$  ядер. Величина  $\lambda N$  – это активность ( $A$ ), характеризующая излучение не отдельного ядра, а группы ядер в целом. Она показывает количество атомов, распадающихся за определенный период.

Мерой радиоактивности какого-либо количества радионуклида, находящегося в данном энергетическом состоянии в данный момент времени, является активность:

$$A = \frac{dN}{dt},$$

где  $A$  – активность,

$dN$  – ожидаемое число спонтанных ядерных превращений из данного энергетического состояния, происходящих за промежуток времени  $dt$ .

Промежуток времени, за который распадается половина всех атомов вещества, называется периодом полураспада ( $T$ ) и является

постоянным, то есть не может быть изменен никакими воздействиями.

Уменьшение числа активных ядер во времени происходит согласно **закону радиоактивного распада** (рисунок 1.2), который описывается экспоненциальной кривой и формулируется следующим образом: *за равные промежутки времени происходит превращение равных долей активных атомов.*

Для каждого радионуклида характерна определенная скорость радиоактивного распада, которая является величиной постоянной.

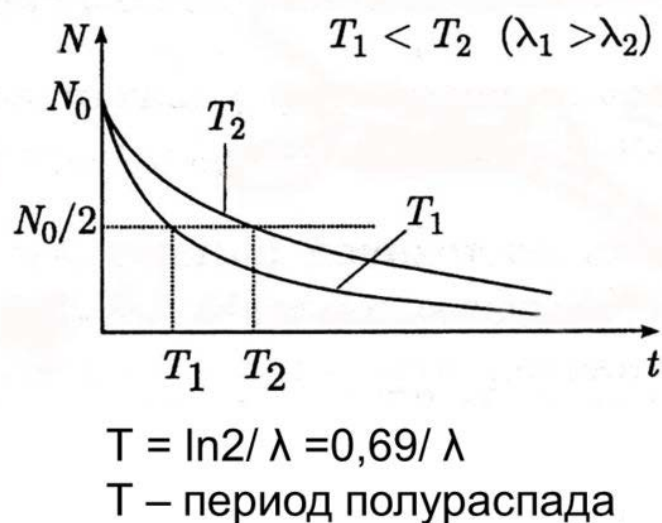
Радиоактивный распад до полного самоуничтожения описывается следующим уравнением:

$$A_t = A_0 \times e^{-0,693 \cdot t/T},$$

где  $A_0$  – начальная активность,

$A_t$  – активность спустя время  $t$ ,

$T$  – период полураспада.



**Рисунок 1.2.** График радиоактивного распада

Радиоактивность измеряется в системе СИ в Беккерелях (Бк, Bq). 1 Бк равен активности радионуклида в источнике, в котором за 1 с происходит 1 распад (1 Бк = 1 распад/с). Данная единица получила название в 1975 г. в честь французского ученого А. Беккереля (А. Becquerel, 1852-1908 гг.). В связи с тем, что Беккерель – это малая активность, на практике чаще используют кратные производные десяти:

декаБк, гектоБк, килоБк, мегаБк, гигаБк, тераБк, петаБк, эксаБк, соответственно равные  $10^1$ ,  $10^2$ ,  $10^3$ ,  $10^6$ ,  $10^9$ ,  $10^{12}$ ,  $10^{15}$  и  $10^{18}$  Бк (таблица 1.3).

Традиционной единицей радиоактивности является Кюри (Ки, Ci), введенная в 1910 г. в честь французских ученых П. Кюри и М. Склодовской-Кюри. 1 Ки соответствует количеству радиоактивного вещества, которое распадается с интенсивностью  $3,7 \times 10^{10}$  распадов в 1 секунду, то есть  $1 \text{ Ки} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Бк}$ ,  $1 \text{ Бк} = 2,703 \times 10^{-11} \text{ Ки}$ .

Так как Кюри – это крупная единица, применяют дольные производные десяти: дециКи, сантиКи, миллиКи, микроКи, наноКи, пикоКи, фемтоКи, аттоКи, соответствующие  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-9}$ ,  $10^{-12}$ ,  $10^{-15}$  и  $10^{-18}$  Ки (таблица 1.3).

**Таблица 1.3** – Десятичные приставки к единицам измерения радиоактивности

Наименование	Обозначение	Отношение к главной единице	Наименование	Обозначение	Отношение к главной
атто	а (a)	$10^{-18}$	екса	Е (E)	$10^{18}$
фемто	ф (f)	$10^{-15}$	пета	Р (P)	$10^{15}$
пико	п (p)	$10^{-12}$	тера	Т (T)	$10^{12}$
нано	н (n)	$10^{-9}$	гига	Г (G)	$10^9$
микро	мк (μ)	$10^{-6}$	мега	М (M)	$10^6$
милли	м (m)	$10^{-3}$	кило	к (k)	$10^3$
санти	с (c)	$10^{-2}$	гекто	г (h)	$10^2$
деци	д (d)	$10^{-1}$	дека	да (da)	10

Существует **4 основных типа радиоактивных превращений** нестабильных ядер: *α-распад*, *β-распад* (в том числе *электронный захват*), *γ-распад* (рисунок 1.3) и *спонтанное деление тяжелых ядер*. Процесс радиоактивного распада экзотермичен, проходит с выделением энергии. Исходное ядро называется *материнским*, а ядро, получающееся после распада – *дочерним*.

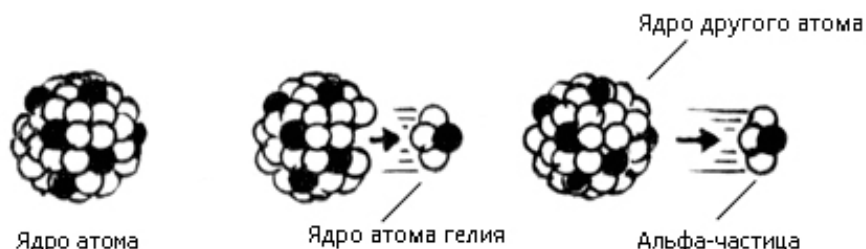
Радиоактивный α-распад происходит внутри ядра. Суть его состоит в том, что тяжелое ядро спонтанно испускает α-частицу. При этом порядковый номер вещества уменьшается на 2 единицы, а массовое число – на 4 единицы. Известно более 200 α-активных ядер, почти все они имеют порядковый номер более 83 (например, Am-241, Ra-226, Rn-222, Rn-238, U-235, Th-232, Pu-239, Pu-240).

Радиоактивное  $\beta$ -превращение ядер – процесс внутринуклонный. В данном случае распад одиночного нуклона приводит к внутренней перестройке ядра. В процессе распада образуются  $\beta$ -частицы (электрон  $e^-$ , позитрон  $e^+$ , нейтрино  $\nu$ , антинейтрино  $\bar{\nu}$ ).

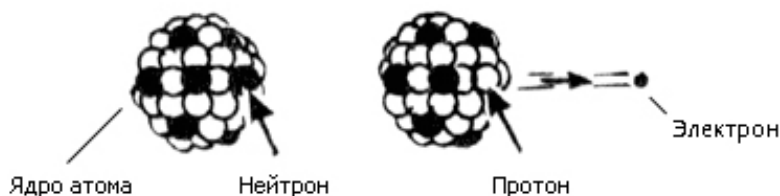
К  $\beta$ -излучающим радионуклидам относятся I-129, I-131, K-40, а также искусственные радиоактивные изотопы, представленные в таблице 1.4.

Распределение вылетающих электронов по энергетическим уровням для одинаковых ядер закономерно и называется *спектром электронов  $\beta$ -распада или  $\beta$ -спектром*.

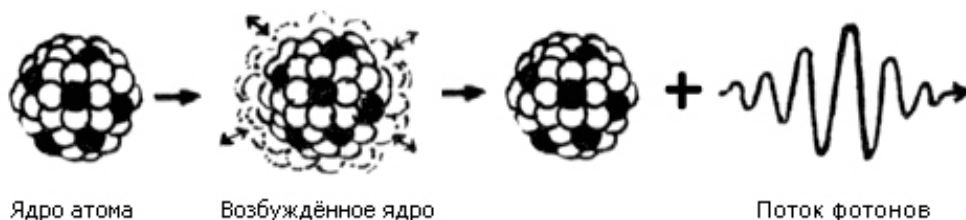
### Альфа-распад



### Бета-распад



### Гамма-распад



**Рисунок 1.3.** Некоторые виды радиоактивных превращений

К внутриядерным явлениям относится также  $\gamma$ -распад, которому подвергаются, например, ядра изотопов Rb-81, Cs-134, Cs-135, In-113, Y-90.

При  $\gamma$ -распаде ядро испускает за счет энергии возбуждения  $\gamma$ -квант и переходит в более стабильное состояние, не сопровождающееся изменением массового числа и атомного номера. Спектр  $\gamma$ -излучения всегда дискретен, то есть прерывается.

В качестве  $\gamma$ -излучателей также чаще используют искусственные радиоактивные элементы (таблица 1.5).

**Таблица 1.4** – Радиоактивные элементы, применяемые как  $\beta$ -излучатели

Изотоп	Период полураспада	Максимальная энергия, МэВ
<sup>90</sup> Y (иттрий)	2,67 суток	2,26
<sup>198</sup> Au (золото)	2,69 суток	0,96
<sup>32</sup> P (фосфор)	14,3 суток	1,71
<sup>144</sup> Ce (церий)	284 суток	0,3
<sup>106</sup> Ru (рутений)	366 суток	0,039
<sup>147</sup> Pm (прометий)	2,62 года	0,223
<sup>204</sup> Tl (таллий)	3,78 года	0,765
<sup>90</sup> Sr (стронций)	29,1 года	0,61

**Таблица 1.5** – Радиоактивные элементы, используемые в качестве  $\gamma$ -источников

Изотоп	Период полураспада	Энергия, МэВ
<sup>192</sup> Ir (иридий)	74 суток	0,137-0,651
<sup>182</sup> Ta (тантал)	115 суток	0,462-1,23
<sup>75</sup> Se (селен)	120 суток	0,07-0,4
<sup>170</sup> Tm (тулий)	129 суток	0,08
<sup>109</sup> Cd (кадмий)	1,27 года	0,086; 0,336
<sup>127</sup> Te (теллур)	2,06 года	0,0885
<sup>134</sup> Cs (цезий)	2,3 года	0,0566
<sup>60</sup> Co (кобальт)	5,27 года	1,7; 1,33
<sup>154</sup> Eu (европий)	8,8 года	0,399-1,4
<sup>137</sup> Cs (цезий)	30 лет	0,202-1,367

Спонтанное деление тяжелых ядер возможно при значении массового числа выше 232. В этом случае ядро делится на 2 примерно



одинаковых по массе осколка с избыточным количеством нейтронов, которые затем претерпевают несколько последовательных превращений (чаще –  $\beta$ -распад). Процесс деления тяжелых ядер при захвате ими нейтронов находит применение в ядерной энергетике.

### **Дифференциация, цель, задачи, методы радиационной медицины, взаимосвязь с другими науками**

Изучением излучений, исследованием их влияния на физиологические объекты и окружающую среду занимается фундаментальная **радиология** – наука об излучениях. Она включает проблемы радиационной физики, радиационной химии, радиобиологии и радиоэкологии. **Медицинская радиология** является частью радиологии и представляет область знаний об использовании излучений в медицине. Наиболее важными разделами ее является *лучевая диагностика* и *лучевая терапия*. **Радиобиология**, как часть фундаментальной радиологии, изучает влияние излучений на живые организмы, сообщества и биосферу в целом. **Медицинская радиобиология** изучает лучевые поражения человека.

Лучевые поражения человека, вызванные ионизирующим излучением, имеют большую социальную, практическую и экономическую значимость. В связи с этим они являются предметом самостоятельной науки – *радиационной медицины*. Радиационная медицина, наряду с экологической, авиационной, военной, космической, спортивной, судебной, катастроф, труда и другими, является отдельной областью *медицины* – системы научных знаний и практических мер, направленной на распознавание, лечение и предупреждение болезней, сохранение и укрепление здоровья, трудоспособности и продление жизни людей.

**Радиационная медицина** – наука об этиологии, патогенезе, клинике, диагностике, лечении и профилактике лучевых поражений человека, вызванных ионизирующим излучением. Она изучает средовую патологию, называемую **лучевыми детерминированными и стохастическими поражениями**, обусловленными ионизирующими факторами. К *детерминированным* лучевым поражениям относятся острая и хроническая лучевая болезнь, лучевая катаракта и другие локальные поражения, *сомато-стохастическим* – онкологическая и наследственная патология.

В радиационной медицине выделяют направления:

- дозиметрическое;

- радиобиологическое;
- радиационно-защитное;
- методологическое.

Дозиметрическое направление включает изучение закономерностей формирования доз ионизирующих излучений у персонала и населения, радиобиологическое – изучение закономерностей влияния ионизирующей радиации на здоровье, радиационно-защитное – изучение и разработку методов защиты от ионизирующих излучений, методологическое – разработку теоретических основ радиационной медицины.

Радиационная медицина как наука разделяется на *общую* и *частную*. *Общая* радиационная медицина включает теоретические основы, методологию, этиологические и рискованные дозы ионизирующих излучений, патогенез лучевых поражений, общие клинические проявления, принципы диагностики, лечения, профилактики и оценки риска лучевой патологии. *Частная* радиационная медицина изучает острую и хроническую лучевую болезни, локальные, комбинированные и сочетанные лучевые поражения, отдаленные последствия лучевых поражений.

Радиационная медицина направлена на сохранение и укрепление здоровья человека в условиях действия ионизирующей радиации. Ее **цель** – предотвращение лучевых поражений и снижение уровня заболеваемости ими.

**Задачи** радиационной медицины состоят в:

- ✓ изучении влияния ионизирующих излучений на организм человека, механизмов развития и клинических проявлений лучевых поражений;
- ✓ разработке методов диагностики, лечения и профилактики лучевых поражений.

Кроме этого радиационная медицина вместе с другими науками занимается исследованием проблем организации оказания медицинской помощи при радиационных авариях, участвует в нормировании уровней облучения различных категорий населения при медицинских обследованиях, а также профессиональном контакте с источниками излучения в обычных и аварийных условиях.

В последние годы обнаружена безосновательность многих устоявшихся представлений в радиационной медицине. В связи с этим определены особенности современной радиационной медицины, включающие:

- ✓ исследование уровней облучения населения от различных источников ионизирующей радиации;
- ✓ обнаружение неизвестных прежде источников и оценку их вклада в дозу облучения населения;
- ✓ изучение значения малых доз ионизирующего излучения для здоровья;
- ✓ уточнение взвешивающих коэффициентов разных видов ионизирующего излучения и отдельных тканей и органов;
- ✓ выявление коэффициентов риска для детерминированных лучевых поражений, а также соматических и генетических последствий облучения;
- ✓ оптимизацию радиационного контроля и других мероприятий по радиационной безопасности.

С целью решения главных задач радиационной медицины осуществляется изучение ионизирующей радиации и вызываемых ей лучевых поражений человека. Ионизирующие излучения исследуют с помощью физических, химических, физико-химических, биологических дозиметрических и радиометрических методов. Для изучения лучевых поражений применяют микробиологические, паразитологические, биохимические, гистологические, патологоанатомические, патофизиологические, клинические методы, а также лабораторные и инструментальные исследования.

Указанные методы используют в натурных, лабораторных и модельных исследованиях. В частности, в натурных исследованиях изучение влияния ионизирующего излучения на организм отдельного человека и население в целом реализуется дозиметрическими и радиохимическими обследованиями радиологических объектов и загрязненных территорий, выявлением причинно-следственных отношений в системе «радиационная обстановка – здоровье человека». В лабораторных исследованиях проводятся эксперименты на лабораторных животных, в модельных – создаются биологические и математические модели радиационных систем.

Радиационная медицина имеет широкие междисциплинарные **связи** с радиобиологией, радиоэкологией, радиационной химией, ядерной физикой, биохимией, патофизиологией, патанатомией, эпидемиологией, медициной катастроф, радиационной гигиеной, фармакологией и клиническими дисциплинами, включая пропедевтику и терапию внутренних болезней, онкологию, лучевую терапию, лучевую диагностику. В ее рамках также используются элементы прикладной иммунологии, аллергологии и токсикологии.

Следует особо отметить тесную взаимосвязь радиационной медицины с *радиационной гигиеной*, разделом гигиены – науки о сохранении и укреплении индивидуального и общественного здоровья. **Радиационная гигиена** как наука, изучающая условия, вид и последствия воздействия ионизирующих излучений на человека и разрабатывающая мероприятия по охране его здоровья, включает три направления:

- дозиметрическое (изучение источников и уровней облучения);
- радиобиологическое (изучение в эксперименте и эпидемиологических исследованиях эффектов и последствий воздействия излучений на здоровье);
- обоснование и разработку санитарно-гигиенических регламентов мер защиты.

Мероприятия по профилактике вредного влияния ионизирующих излучений на организм человека и охрану среды от радиоактивного загрязнения реализуются радиационной гигиеной в виде санитарного законодательства по радиационной безопасности и являются обязательными для исполнения.

### **Краткая история развития радиационной медицины**

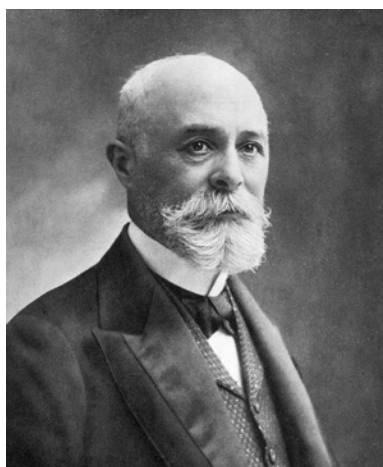
История развития медицинской радиологии, медицинской радиобиологии и радиационной медицины началась вместе с величайшими открытиями конца XIX века, которые инициировали освоение энергии атома. В частности, В.К. Рентгеном (1895) (рисунок 1.4) были открыты X-лучи, позже названные рентгеновскими.



**Рисунок 1.4.** Вильгельм Конрад Рентген

А. Беккерелем (1896 г.) (рисунок 1.5) была открыта естественная радиоактивность урана, П. Кюри, М. Склодовской-Кюри (1898 г.) (рисунок 1.6) – радиоактивные свойства полония и радия, Э. Резерфордом (1899 г.) (рисунок 1.7) –  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучения при радиоактивном распаде.

Далее в ядерной физике были открыты нейтроны (Ф. Жолио-Кюри, Дж. Чедвик), получены искусственные радионуклиды при облучении нейтронами стабильных изотопов (Ф. Жолио-Кюри, 1934 г.), выявлена цепная реакция деления урана (Э. Ферми, Ф. Жолио-Кюри, Л. Коварски и др., 1939 г.).



**Рисунок 1.5.** Антуан Анри Беккерель



**Рисунок 1.6.** Пьер Кюри, Мария Склодовская-Кюри

Открытия ядерной физики начали широко использоваться для различных целей человечества. Первый в мире атомный реактор был

создан в 1942 г. в США, первые атомные бомбы испытаны в 1945 г. в Хиросиме и Нагасаки. В СССР ядерный реактор был сооружен в 1946 г., в 1954 г. была построена первая атомная электростанция и создано термоядерное оружие. Атомная энергия осваивалась также во Франции, Великобритании и других странах. К 1979 г. на Земле работало уже 200 атомных электростанций, на сегодняшний день их насчитывается около 500.

К сожалению, в мире постоянно регистрируются серьезные аварии на АЭС, которым сопутствуют выбросы в окружающую среду радионуклидов и лучевые поражения человека.



**Рисунок 1.7.** Эрнест Резерфорд

Испытаниями ядерного оружия в атмосфере сопровождалась гонка вооружений между США и СССР с максимумом в 1954-1958 гг. и в 1961-1962 гг. и масштабным загрязнением среды обитания радионуклидами. Также осуществлялись наземные и подземные, надводные и подводные ядерные взрывы. Испытания ядерного оружия проводятся и по сей день.

Синхронно с открытием ионизирующих излучений возникли обусловленные необходимостью лечения и предупреждения лучевых поражений предпосылки для формирования медицинской радиологии, радиобиологии и радиационной медицины. Первыми получили лучевые дерматиты пациенты, которым проводились рентгеновские снимки, и врачи, выполняющие данные процедуры. Поражения кожи были отмечены П. Кюри после облучения радием собственной руки и М. Склодовской-Кюри, часто бравшей в руки препараты радия. В целом за первых 65 лет с открытия ионизирующей радиации жертвами лучевых поражений стали более 360 ученых.

В медицине впервые применил радий для лечения злокачественных новообразований французский врач Г.А. Данло в 1901 г. В 1914-1918 гг. в военных госпиталях Франции под руководством М. Склодовской-Кюри работали рентгенологические и радиологические отделения. В России рентгенология и радиология начали развиваться с исследований С.В. Гольдберга, Е.С. Лондона, В.М. Иванова и других ученых. В 1904 г. С.В. Гольдберг опубликовал монографию, посвященную влиянию радия на кожные покровы.

Параллельно с описанием лучевых поражений уточнялась их этиология, клинические проявления, разрабатывалась диагностика и мероприятия по лечению и предупреждению. Впервые в 1906 г. в своей монографии Д.Ф. Решетило уделил внимание необходимости защиты органов зрения очками с просвинцованными стеклами, всего тела – фартуками и экранами, указал на значение времени и расстояния в предупреждении облучения при работе с рентгеновскими лучами. Вопросы обеспечения радиационной безопасности персонала и пациентов были основным предметом обсуждения на 1 Всероссийском съезде по борьбе с раковыми заболеваниями в 1914 г.

В Советском государстве большой интерес вызывало развитие ядерной физики, радиационной химии, радиобиологии, радиоэкологии, радиационной гигиены, послуживших базой для атомной энергетики. В 1921 г. академик радиохимик В.Г. Хлопин (рисунок 1.8) получил первые отечественные препараты радия и тория, в 1922 г. в Ленинграде был создан Государственный радиевый институт, сотрудники которого решали вопросы изыскания радиевых руд и получения радия.



**Рисунок 1.8.** Виталий Григорьевич Хлопин

В 1935 г. сотрудники Центрального института гигиены труда и промышленной санитарии В.А. Левицкий и А.А. Летавет опубликовали итоги изучения условий труда и состояния здоровья работников производства радия.

Загрязнение среды радионуклидами при испытаниях ядерного оружия обусловило в 1945 г. организацию радиологической лаборатории в НИИ гигиены труда и профессиональных заболеваний АМН СССР. Специализированные лаборатории также существовали при Институте биофизики МЗ СССР. В 1956 г. был основан Ленинградский научно-исследовательский институт радиационной гигиены, в 1957 г. – сформированы радиологические лаборатории в гигиенических институтах. Подготовка кадров началась в 1957 г. с организации в ЦОЛИУВ в Москве академиком АМН СССР Ф.Г. Кротковым (рисунок 1.9) кафедры радиационной гигиены. Подобные кафедры были созданы в Киевском и Ленинградском институтах усовершенствования врачей, а с 1960 г. радиационную гигиену включили в программу подготовки врачей гигиенического профиля.



**Рисунок 1.9.** Федор Григорьевич Кротков

Важность вопросов защиты от ионизирующих излучений объединила усилия ученых всего мира. О радиационной безопасности шла речь еще на I Международном конгрессе по рентгенорадиологии в 1925 г. В целях разработки способов защиты от ионизирующих излучений и установления допустимых уровней облучения в 1928 г. на II Международном конгрессе радиологов сформировали Международную комиссию по радиационной защите (МКРЗ). Позднее были основаны Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) и Научный комитет ООН по действию атомной радиации (НКДАР).



Сейчас во многих странах, в том числе и Беларуси, работают национальные комиссии этих международных организаций.

Указанные выше советские ученые В.Г. Хлопин, В.А. Левицкий, А.А. Летавет, Ф.Г. Кротков внесли значительный вклад в изучение ионизирующих излучений. Немаловажная роль в развитии медицинской радиологии, радиобиологии и радиационной медицины принадлежит советским и русским ученым Л.А. Ильину, Г.И. Алексееву, Г.Д. Байсоголову, Н.В. Бутомо, Л.А. Булдакову, П.Д. Горизонтову, А.К. Гуськовой, Н.Г. Даренской, Е.А. Жербину, А.М. Никифорову, П.В. Рамзаеву, М.Н. Форшатову, А.Ф. Цыбу, а также отечественным ученым Е.Ф. Конопле, Я.Э. Кенигсбергу.

В Республике Беларусь радиационная медицина как самостоятельная наука интенсивно начала формироваться с 1986 г. после аварии на Чернобыльской АЭС. В медицинских университетах преподавалась радиационная гигиена, врачам лечебного профиля начала преподаваться радиационная медицина как самостоятельными кафедрами радиационной медицины, так и кафедрами онкологии, общей гигиены. В Беларуси был создан РНПЦ радиационной медицины и экологии человека, в РНПЦ гигиены – лаборатория радиационной безопасности.

Сильный толчок развитию новой науки дала монография «Радиационная медицина» коллектива авторов под редакцией академика Л.А. Ильина. В Республике Беларусь под редакцией профессора А.Н. Стожарова были изданы учебное пособие и учебник по радиационной медицине, В.Н. Матвеевко - курс лекций и учебное пособие по радиационной медицине. Большой популярностью при подготовке кадров пользуется учебное пособие по радиационной медицине, изданное под редакцией С.С. Алексанина и А.Н. Гребенюка.

### **Значение радиационной медицины для врача лечебного профиля**

Радиационная медицина играет важную роль в предотвращении лучевых поражений, сохранении, укреплении и восстановлении здоровья населения и подготовке медицинских кадров. Врач должен лечить и осуществлять индивидуальную и популяционную профилактику лучевой патологии, эффективно вести работу по радиологическому обучению и воспитанию здоровых и больных людей, особенно проживающих в условиях радиационного загрязнения. Только в этом

случае может сложиться возможность успешной охраны здоровья человеческой популяции.

В последнее время в связи с широким использованием естественных и искусственных источников ионизирующих излучений в науке, медицине, промышленности, быту, созданием и испытанием ядерного оружия, работой ядерных энергетических установок существенно увеличился уровень воздействия радиации на население и персонал. Резко возрастает вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций радиационного характера и возможность поражения людей радиацией.

В результате аварии на Чернобыльской атомной электростанции (АЭС) был осуществлен выброс из ядерного реактора большого количества радионуклидов в среду обитания, что обусловило возникновение значительных медицинских и социальных проблем для населения Беларуси, Украины и России. Экологическая и социально-экономическая катастрофы, к которым привела указанная авария, потребовала огромных экономических затрат от нашего государства. В соответствии с ущербом, нанесенным данной катастрофой, территория Республики Беларусь была отнесена к зоне экологического бедствия. Медицинские последствия аварии связаны с онкологической патологией щитовидной железы у детей и взрослых Беларуси, ростом общей соматической заболеваемости и связанным с этим сокращением продолжительности жизни, а также ростом инвалидности взрослого населения. Причиной этому была сформированная за счет облучения населения различными радионуклидами значительная коллективная доза.

Ранее объектом внимания являлись группы работников, имеющие профессиональный контакт с источниками ионизирующего излучения как вредным производственным фактором. Сейчас значение имеет также хроническое влияние радиации в сравнительно небольших дозах, особенно в результате внутреннего облучения при кумуляции в организме долгоживущих радионуклидов. Кроме этого сложность в решении вопросов радиационной медицины обусловлена многообразием клинических проявлений, возникающих при действии на организм ионизирующих излучений.

В современном мире есть риск радиологического терроризма, ядерного терроризма, а также террористических актов с использованием источников ионизирующих излучений, которые могут вызвать мощное радиоактивное загрязнение среды обитания и лучевые поражения человека.

Таким образом, знание основ радиационной медицины, механизмов действия ионизирующего излучения на организм человека, а также последствий такого воздействия для будущего врача лечебного профиля имеет особую значимость.

### Характеристика лучевых поражений

Как было указано выше предметом радиационной медицины является этиология, патогенез, клиника, диагностика, лечение и профилактика лучевых поражений.

Лучевые поражения возникают под воздействием ионизирующих излучений. Причиной, или *этиологией*, лучевой патологии являются корпускулярные  $\alpha$ -,  $\beta$ - (электронное и позитронное), протонное, нейтронное излучения, а также фотонные  $\gamma$ - и рентгеновское излучения.

Ионизирующие излучения способны проникать в биологические ткани, клетки, субклеточные структуры и модифицировать атомы и молекулы на расстоянии, вызывая за счет физических взаимодействий и радиационно-химических реакций одномоментную их ионизацию. *Дистанционность* воздействия является принципиальным отличием ионизирующей радиации от других повреждающих факторов внешней среды.

После воздействия ионизирующих излучений развиваются лучевые поражения. В механизме их развития, или *патогенезе*, выделяют физическую, физико-химическую, химическую и биологическую стадии. Физическая, физико-химическая и химическая стадии действия ионизирующего излучения называются *первичными* или *добиологическими*. Они общие для живой и неживой материи.

Во время добиологических стадий (*коротких*) нарушения происходят на молекулярном уровне. В процессе биологической стадии (*длинной*) лучевые поражения формируются на уровне клетки, ткани, органа и организма.

Последствия биологической стадии делятся по времени на *ближайшие*, или *ранние*, и *отдаленные*, или *поздние*, а по характеру проявления – на *детерминированные*, или *определенные*, и *стохастические*, или *вероятностные*. Ближайшие последствия появляются спустя короткое время после облучения, отдаленные – спустя длительный промежуток времени. *Детерминированные* (от латинского *determine* – определять) *эффекты* возникают в организме вскоре после облучения и, следовательно, являются ближайшими или ранними.

*Стохастические* (от латинского stochastic – случайный) *эффекты* возникают в организме в отдаленные сроки после облучения (отдаленные последствия) и, следовательно, являются поздними. Они носят вероятностный характер и могут быть обнаружены при длительном наблюдении за значительными по количеству группами людей.

Отличительной особенностью проявления биологических последствий является наличие *порога для детерминированных и его отсутствие для стохастических эффектов*. Поэтому снижение дозы облучения до значений меньше пороговых может свести риск возникновения детерминированных эффектов к нулю. Риск возникновения стохастических эффектов может быть уменьшен путем снижения дозы облучения, но ввиду отсутствия порога останется.

Для *биологического действия* ионизирующих излучений свойственны нарушения жизнедеятельности организма. Они оказывают влияние на наследственный аппарат организма, поэтому биологическое действие может распространяться и на последующие поколения.

Ионизирующие излучения могут происходить от внешних источников, а также попавших в организм радиоактивных изотопов. При внутреннем облучении для биологического действия ионизирующих излучений огромное значение имеет химическая характеристика радионуклида, определяющая его участие в обмене веществ, концентрация в том или ином органе, а, следовательно, и характер облучения организма.

Кроме сказанного, большое значение имеют *возраст, физиологическое состояние, интенсивность обменных процессов организма, а также условия облучения*. Важную роль, помимо дозы облучения организма, играют *мощность, ритм и характер облучения, его физические особенности*, определяющие глубину проникновения энергии в организм, *плотность ионизации*. Все эти особенности воздействующей радиации определяют *относительную биологическую эффективность излучения*.

Лучевые поражения имеют разнообразные клинические формы с соответствующими ведущим патогенетическим механизмам формирования патологического процесса клиническими синдромами. В клинике поражений, индуцированных ионизирующей радиацией выделяют периоды формирования, восстановления, а также исходов и последствий.

Вначале отмечают *первичную острую реакцию* с местными проявлениями, нейромоторным, нейрососудистым и диспептическими

симптомами. Особенностью клиники является наличие *скрытого (латентного) периода*, продолжительность которого (от нескольких минут до десятков лет) зависит от дозы облучения и радиочувствительности организма. Например, облучение очень мощными дозами приводит к гибели непосредственно во время воздействия ионизирующей радиации («смерть под лучом»). Длительное же действие излучения в малых дозах способствует возникновению нарушений нервной и других систем, онкозаболеваний через годы после облучения. После латентного периода наступает *разгар* болезни с усилением всех симптомов, завершающийся восстановлением либо смертью.

**Диагностика** лучевых поражений базируется на сборе анамнеза, клинической картине и результатах лабораторных и инструментальных исследований. При *сборе анамнеза* придают значение условиям облучения, продолжительности пребывания пораженных в загрязненной радионуклидами зоне, имеющимся средствам индивидуальной защиты на момент облучения.

При *опросе* отмечают жалобы пациентов, *осмотре* - клинические признаки болезни.

Инструментальными исследованиями выявляют функциональные и структурные нарушения критических и некритических органов, лабораторными исследованиями – гематологические, биохимические и другие изменения в организме. Радиометрами и спектрометрами изучают наличие радионуклидов в мазках, физиологических жидкостях, выделениях, приборами СИЧ определяют содержание радионуклидов во внутренних органах и всем организме.

**Лечение** лучевых поражений включает назначение щадящего режима с обязательным пребыванием на воздухе, этиотропной, патогенетической и симптоматической терапии.

Особое внимание уделяется проведению ряда мероприятий до лечения лучевой болезни:

- прекращению облучения;
- определению дозы внешнего и внутреннего облучения;
- дезактивации одежды, кожи.

Этиотропная терапия лучевых поражений направлена на причину болезни и включает назначение лекарственных средств, инактивирующих радионуклиды.

При патогенетической терапии воздействуют на патогенетические механизмы и применяют иммуномодуляторы, ингибиторы протеолиза, антиоксиданты, дезинтоксиканты.

Симптоматическая терапия включает назначение:

- при наличии рвоты – противорвотных;
- при сердечно-сосудистой недостаточности – сердечных;
- при психомоторном возбуждении – седативных лекарственных средств.

При повреждении клеток, тканей и органов используется заместительная, при обезвоживании – инфузионная терапия, присоединении инфекции – антибиотикотерапия.

При дезинтоксикационной терапии проводится парентеральное питание, введение растворов белка и сбалансированных аминокислот, заместительной – переливание крови и ее компонентов, аллогенная пересадка костного мозга от донора, ткани которого соответствуют тканям реципиента на генетическом уровне, или клетки печени человеческого эмбриона, инфузионной – переливание физиологического и других изотонических растворов, кровезаменяющих жидкостей.

Возможны хирургические вмешательства по показаниям сразу после облучения или после восстановления гемопоеза.

Для предупреждения лучевой патологии проводятся мероприятия по:

- *радиационной безопасности;*
- *радиационной защите;*
- *медицинской профилактики лучевых поражений.*

Обеспечение **радиационной безопасности** населения базируется на Конституции Республики Беларусь и реализуется Законами Республики Беларусь «О радиационной безопасности населения», «Об использовании атомной энергии», «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения», а также координируется актами Президента Республики Беларусь и нормативными правовыми актами. Главные *принципы* обеспечения радиационной безопасности – нормирования, обоснования, оптимизации.

Анализ Чернобыльской катастрофы показал, что в случае аварий на приграничных Смоленской, Чернобыльской, Ровенской, Игналинской АЭС, а также строящейся Белорусской АЭС произойдет масштабное загрязнение территории Беларуси и дополнительное облучение населения. Для предотвращения подобной ситуации необходима разработка превентивных мер защиты. С этой целью в республике была принята **Концепция защиты населения Республики Беларусь при радиационных авариях на АЭС**, которая согласована Национальной комиссией по радиационной защите, одобрена коллегией Министерства здравоохранения и утверждена Главным Государственным санитарным врачом 28 мая 1993 года. Концепция направлена

на обоснование защитных мероприятий, предотвращающих возникновение детерминированных эффектов (острая лучевая болезнь, лучевой гипотиреоз, лучевая катаракта), а также ограничивающих риск возникновения стохастических эффектов (онкологических заболеваний и генетических последствий). Защитные мероприятия предусматриваются на период первых 10 дней после аварии.

Выбор мер защиты определяют мощность экспозиционной дозы на местности и прогнозируемая с момента аварии до 10 суток после нее индивидуальная доза облучения. В случае если мощность дозы составляет 1 мкЗв/ч и больше, вводят запрет на потребления местных пищевых продуктов и воды, ограничивают пребывание людей на открытой местности, 50 мкЗв/ч и больше – проводится укрытие и в случае выброса радиоактивного йода – йодная профилактика населения, 200 мкЗв/ч – временное переселение. Решение об эвакуации населения принимается, когда мощность дозы достигает 500 мкЗв/ч.

Радиационная безопасность в республике обеспечивается проведением комплекса мероприятий по выполнению требований радиационной безопасности республиканскими и местными органами управления, предприятиями, организациями и учреждениями, гражданами, а также информированием населения о радиационной обстановке и обучением и воспитанием по ее обеспечению

Важное значение в обеспечении радиационной безопасности придается *физической, химической и биологической радиационной защите*. **Физическая** радиационная защита человека от радиации включает методы «защиты временем», «защиты количеством», «защиты расстоянием», «защиты экранами», **химическая** – использование радиопротекторов, радиомитигаторов, химических лекарственных средств, **биологическая** – использование радиопротекторов растительного и животного происхождения.

**Медицинская профилактика** представляет комплекс основанных на личной заинтересованности пациента медицинских мероприятий и услуг, направленных на снижение вероятности возникновения лучевых поражений.

В плане **медицинской профилактики** врачи проводят диспансеризацию, назначают радиопротекторы, направляют граждан для оздоровления на санаторно-курортное лечение и другие мероприятия.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Излучения и их значение.

2. Происхождение ионизирующих излучений.
3. Радиационная медицина, цель, задачи, методы, дифференциация, взаимосвязь с другими науками.
4. Краткая история развития радиационной медицины.
5. Значение радиационной медицины для врача лечебного профиля.
6. Характеристика лучевых поражений.



## ГЛАВА 2

### ЭТИОЛОГИЯ ЛУЧЕВОЙ ПАТОЛОГИИ

Причиной лучевой патологии, включающей острую и хроническую лучевую болезнь, локальные лучевые повреждения, а также злокачественные новообразования, анатомическую и физиологическую патологию у потомства, как было указано выше, является ионизирующее излучение, создающееся при радиоактивном распаде, ядерных превращениях, торможении заряженных частиц в веществе.

#### Ионизирующие излучения, их свойства

По природе ионизирующие излучения делят на:

- **корпускулярные** (альфа-, бета-, протонное, нейтронное);
- **квантовые**, или **фотонные** (гамма-, рентгеновское) (таблица 2.1).

**Таблица 2.1** - Характеристика основных видов ионизирующих излучений

Излучение	Вид излучения	Масса, а.е.м.	Заряд
Альфа	Корпускулярное	4	+2
Бета	Корпускулярное	1/1836	+1, -1
Протонное	Корпускулярное	1	+1
Нейтронное	Корпускулярное	1	0
Гамма, рентгеновское	Фотонное	0	0

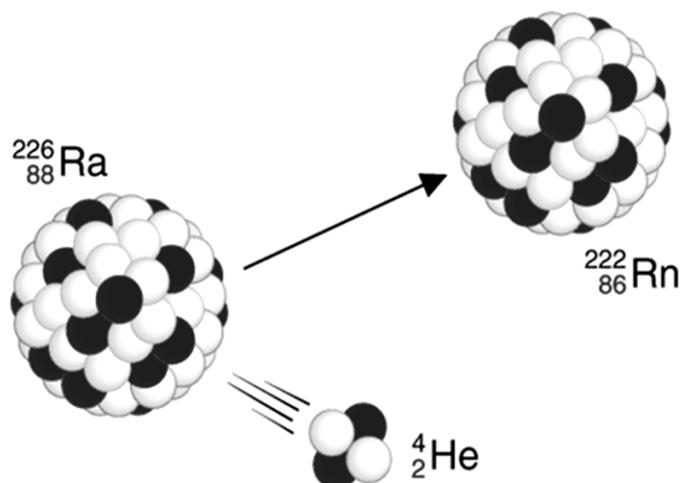
**Альфа-излучение** представляет собой поток  $\alpha$ -частиц (ядер гелия) (рисунок 2.1). Состоит  $\alpha$ -частица из двух нейтронов и двух протонов, имеет заряд +2, массу 4 а.е.м.

Энергия  $\alpha$ -излучения в среднем равна 3-5 МэВ.

**Бета-излучение** – это поток  $\beta$ -частиц (рисунок 2.2).

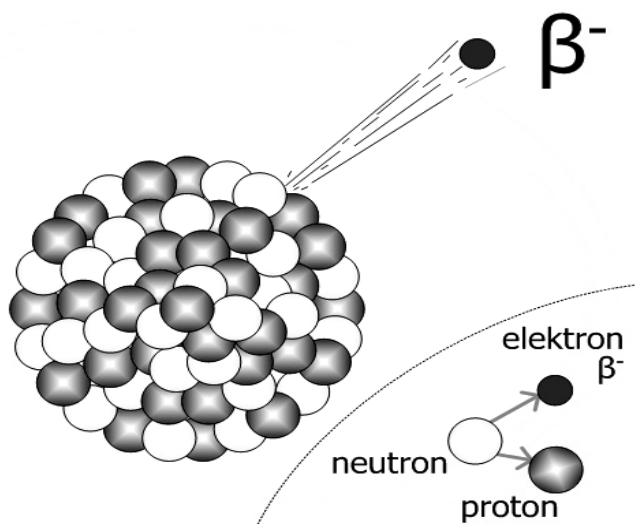
К  $\beta$ -частицам относят электроны и позитроны с зарядом -1 или +1 соответственно и массой 1/1836 а.е.м.

Энергия  $\beta$ -излучения у большинства радионуклидов колеблется в пределах 10-100 кэВ.



**Рисунок 2.1.** Альфа-излучение

**Протонное** излучение представляет собой поток протонов. Протоны имеют заряд +1, массу 1 а.е.м. Энергия протонного излучения может достигать 940 МэВ.



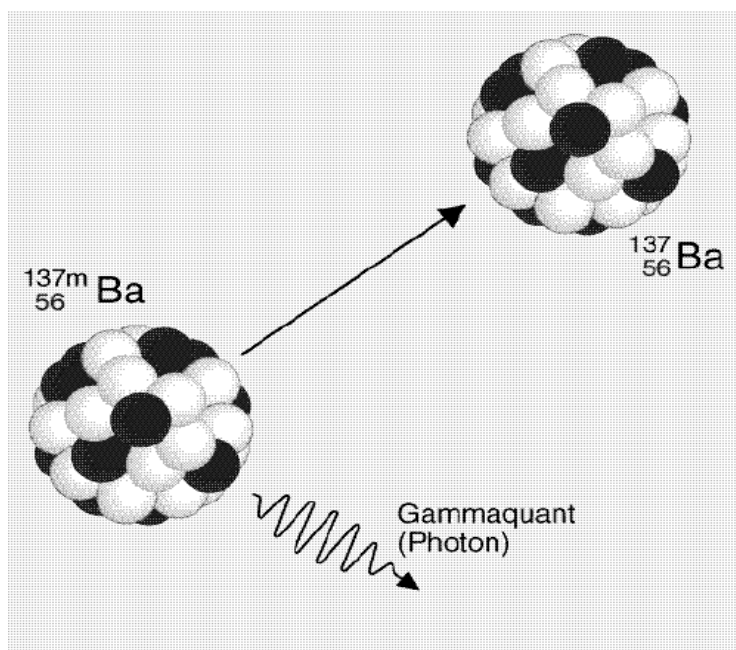
**Рисунок 2.2.** Бета-излучение

**Нейтронное** излучение – это поток нейтронов. Нейтроны имеют массу 1 а.е.м., их заряд равен 0. Различают нейтроны:

- медленные с энергией  $< 0,025\text{-}5$  эВ;

- резонансные с энергией 5-500 эВ;
- промежуточные с энергией 0,5 кэВ - 0,5 МэВ;
- быстрые с энергией 0,5-20 МэВ;
- очень быстрые с энергией 20-300 МэВ;
- сверхбыстрые с энергией > 300 МэВ.

**Гамма-излучение** представляет собой поток  $\gamma$ -квантов с длиной волны  $10^{-10}$ - $10^{-14}$  м (рисунок 2.3).



**Рисунок 2.3.** Гамма-излучение

Его масса и заряд равны нулю, а энергия составляет 1 кэВ - 50 МэВ.

Гамма-излучение с энергией 0,1-0,5 МэВ относится к мягким, 0,5-10 и более МэВ – жестким.

**Рентгеновским**, или **X, излучением** называют совокупность тормозного и характеристического излучения с длиной волны  $10^{-9}$  -  $10^{-12}$  м. Оно не имеет массы и заряда, энергия составляет 1 кэВ - 1 МэВ.

**Тормозное** рентгеновское излучение – это **фотонное** излучение с непрерывным спектром. **Фотоны** высвобождаются, когда в результате столкновения электронов с частицами облучаемого вещества происходит их торможение и изменение кинетической энергии. Чем выше энергия излучения, тем более жестким является тормозное излучение. Это свойство потока электронов используется в рентгеновских трубках.

*Характеристическое* рентгеновское излучение – это **фотонное** излучение с дискретным спектром, образующееся при переходе внутри атома электрона с более высокой орбитали на место электрона более низкой орбитали, выбитого  $\gamma$ -квантами.

Способность излучений вызывать при прохождении через вещество возбуждение его атомов при переходе электронов в состояние с повышенной энергией или ионизацию с образованием из молекул или атомов вещества пар положительно и отрицательно заряженных ионов и свободных электронов называют **ионизирующей способностью**.

По способности ионизировать атомы и молекулы вещества ионизирующие излучения делят на:

- ✓ первично, или прямо ионизирующие излучения;
- ✓ косвенно ионизирующие излучения.

Для **прямо ионизирующих излучений** характерна способность ускоренных  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц непосредственно взаимодействовать с электронными оболочками атомов и непосредственно производить их ионизацию. Так,  *$\alpha$ -частицы* возбуждают и ионизируют вещество путем неупругих столкновений с орбитальными электронами атомов, *бета-частицы* - путем упругих и неупругих взаимодействий. *Протоны* теряют свою энергию также в результате упругого и неупругого рассеивания.

К **косвенно ионизирующим излучениям** относятся электрически нейтральные *нейтронное*,  *$\gamma$ -* и *рентгеновское излучения*, которые, инициируя ускоренные заряженные частицы, возбуждают и ионизируют атомы и молекулы.

Так, вследствие отсутствия заряда нейтроны беспрепятственно проникают вглубь атомов, взаимодействуя непосредственно с ядрами путем:

- упругого рассеивания;
- неупругого рассеивания;
- радиационного захвата.

При упругом рассеивании нейтрон передает ядру часть своей энергии и отклоняется от первоначального направления. Ядро, с которым взаимодействует нейтрон, начинает двигаться и ионизировать другие атомы и молекулы. Такой эффект наиболее характерен для быстрых нейтронов при взаимодействии с ядром водорода, когда нейтрон передает протону более половины своей энергии с образованием протона отдачи.

При неупругом рассеивании часть кинетической энергии нейтрона тратится на возбуждение ядра отдачи, которое затем переходит в стабильное состояние, излучая  $\gamma$ -квант.

Ядра способны поглощать нейтроны, переходя в возбужденное состояние и начиная делиться с испусканием  $\gamma$ -квантов, протонов, нейтронов или  $\alpha$ -частиц (*радиационный захват*). В результате радиационного захвата нерадиоактивные атомы превращаются в радиоактивные («*наведенная активность*»). Этот эффект наиболее характерен для медленных нейтронов.

В процессе прохождения через вещество  $\gamma$ -кванты взаимодействуют с электронами атомов, электрическим полем ядра, а также с нейтронами и протонами, входящими в состав ядра. В результате этих взаимодействий происходит ослабление плотности потока излучения благодаря рассеиванию  $\gamma$ -квантов и передачи их энергии атомам среды.

При прохождении через вещество  $\gamma$ -излучение полностью не поглощается, а лишь ослабляется в определенное число раз за счет:

- *фотоэффекта*;
- *эффекта Комптона*;
- *эффекта образования пары «электрон-позитрон»*.

При фотоэффекте мягкое  $\gamma$ -излучение передает свою энергию электронам внутренней орбитали атома полностью. При этом фотон поглощается, а его энергия расходуется на отрыв электрона и сообщение ему кинетической энергии, идущей для дальнейшей ионизации вещества. Электрон с внешней орбиты переходит на освободившееся место, испуская при этом характеристическое излучений.

При Комpton-эффекте обладающий энергией 0,5-1 МэВ  $\gamma$ -квант передает электрону, находящемуся на внешних оболочках атомов, лишь часть своей энергии, при этом меняя направление своего движения). Далее выбитый электрон производит ионизацию.

Если энергия  $\gamma$ -кванта превышает 1 МэВ, он способен взаимодействовать с ядром атома и преобразовываться в пару *электрон-позитрон*, которые в дальнейшем ионизируют вещество. Позитрон, встречая на своем пути электрон, может соединиться с ним и превратиться в 2 фотона (*эффект аннигиляции*), поглощаемые средой в результате эффекта Комптона или фотоэффекта.

Рентгеновское излучение схоже по действию с  $\gamma$ -излучением. Для него характерно три вида взаимодействия с веществом:

- *упругое рассеивание*;

- фотоэффекта;
- эффекта Комптона.

При упругом рассеивании **фотоны** рентгеновских лучей с энергией, меньше энергии связи электронов с атомным ядром, атомом не поглощаются, а только изменяют направление движения.

При фотоэффекте, когда энергия фотона выше, чем энергия связи электрона с ядром, фотон передает кинетическую энергию свободному электрону. Атом при этом теряет электрон, становится положительно заряженным ионом, и далее поглощается нейтральным атомом, превращая его в отрицательный ион.

Эффект Комптона наблюдается, если энергия фотонов рентгеновского излучения выше энергии ионизации атомов вещества. Фотон передает часть энергии электрону, электрон переходит в возбужденное состояние и высвобождается из атома. Часть энергии, которая осталась, излучается в виде фотона рентгеновского излучения с большей длиной волны (вторичный фотон). Вторичный фотон в свою очередь может ионизировать следующий атом.

Число пар ионов, образованных ионизирующим излучением на микрометр пробега в веществе, называют *линейной плотностью ионизации* (ЛПИ), или *удельной ионизацией*. Средняя энергия в кэВ, теряемая заряженной частицей на микрометр длины пробега, определяется как *линейная передача энергии* (ЛПЭ). Она возрастает при снижении скорости и энергии излучения и в конце пробега достигает максимальных значений. Чем больше ЛПЭ, тем больше ионизирующая способность излучения.

Излучения в зависимости от величины линейной передачи энергии делятся на:

- ✓ редко ионизирующие (ЛПЭ < 10 кэВ/мкм);
- ✓ плотно ионизирующие (ЛПЭ > 10 кэВ/мкм).

К **редко ионизирующим излучениям** относят  $\beta$ -,  $\gamma$ - и рентгеновское излучения, к **плотно ионизирующим** –  $\alpha$ - и нейтронное излучения.

Альфа-излучение образует несколько десятков тысяч пар ионов на микрометр пробега в веществе (1 частица с энергией 3,8 МэВ образует более 100000 пар ионов), и, следовательно, обладает высокой ионизирующей способностью.

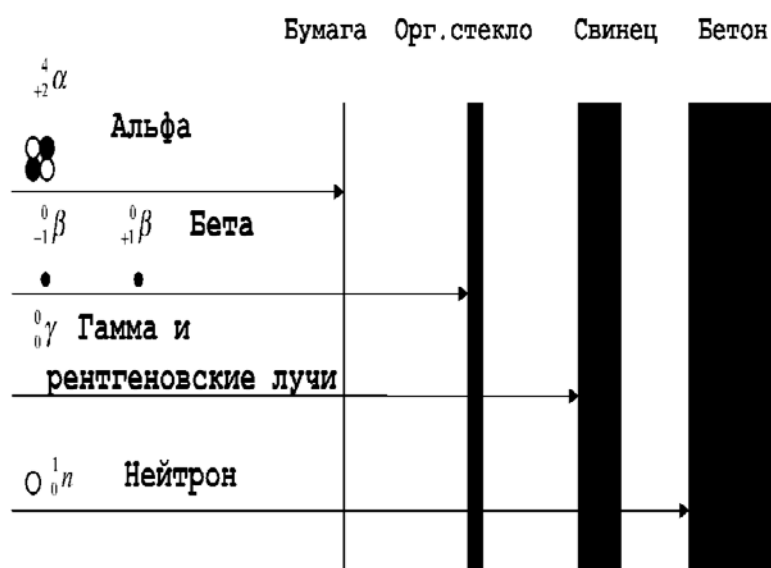
У  $\beta$ -излучения удельная плотность ионизации примерно в тысячу раз меньше, чем у  $\alpha$ -частиц той же энергии (1 частица с энергией 3,8 МэВ ионизирует 100-1000 молекул).

Ионизирующая способность протонов средняя между  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучениями, в конце пробега нарастает.

Нейтронное излучение обладает более низкой ионизирующей способностью, чем  $\beta$ -излучение.

Ионизирующая способность  $\gamma$ -излучения меньше, чем у  $\alpha$ -излучения и равна примерно 100 молекулам, у рентгеновского излучения составляет менее 20 молекул.

Скоростью потери энергии определяется еще одно важное свойство ионизирующих излучений – **проникающая способность**. Глубина проникновения зависит от состава и плотности облучаемого объекта, природы и свойств излучения (рисунок 2.4). Она прямо пропорциональна энергии, массе, квадрату скорости частицы и обратно пропорциональна величине заряда. Чем больше величина ЛПЭ, тем меньше проникающая способность излучения.



**Рисунок 2.4.** Проникающая способность разных видов ионизирующего излучения

Проникающая способность  $\alpha$ -излучения в веществе незначительна,  $\alpha$ -частицы имеют большую массу, следовательно, их траектории в веществе прямолинейны. Пробег  $\alpha$ -частиц в воздухе составляет 3-11 см (в зависимости от величины энергии), в тканях – 10-100 мкм (рисунок 2.5).

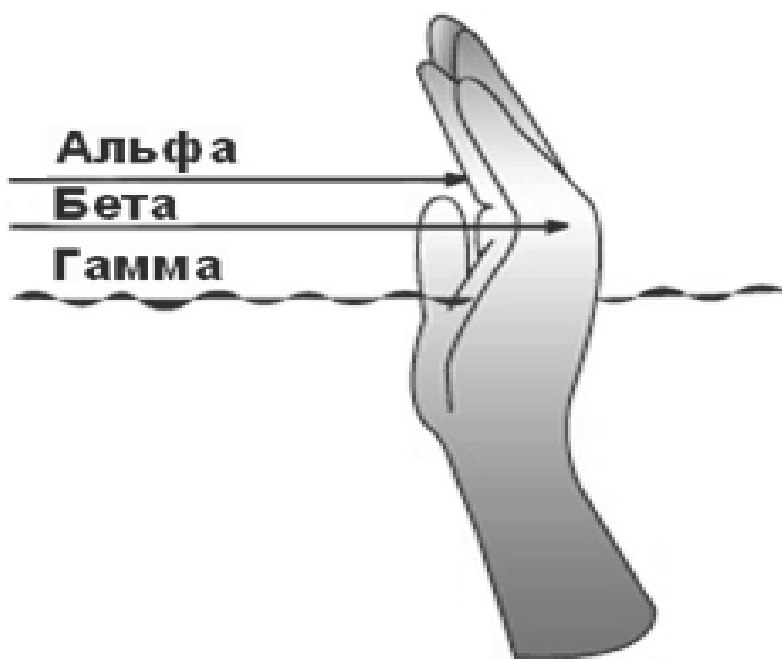
У  $\beta$ -излучения проникающая способность в воздухе в зависимости от энергии составляет 5-20 м, в биологической ткани – 1,5-3 см (рисунок 2.5). Имеющие малую массу  $\beta$ -частицы при продвижении в

веществе отклоняются на большие углы, поэтому траектория их очень извилиста.

Пробег протонов в воздухе равен нескольким метрам, в ткани – до десяти сантиметров. В мягких тканях протоны с энергией 140 МэВ способны продвинуться на 11 см. Траектория протонов в веществе почти прямолинейна до конца пробега.

Проникающая способность нейтронного излучения в воздухе немного ниже, чем у  $\gamma$ -излучения, оно поглощается препятствиями. У нейтронного излучения с энергией 14 МэВ проникающая способность в ткани составляет 10 см.

Самая высокая среди всех ионизирующих излучений проникающая способность у  $\gamma$ -излучения: длина пробега в воздухе – 0,1-3 км, через тело человека проходит насквозь (рисунок 2.5), при прохождении теряет половину энергии.



**Рисунок 2.5.** Пробег в тканях некоторых видов ионизирующего излучения

У рентгеновского излучения проникающая способность ниже, чем у  $\gamma$ -излучения в 1000 раз. Излучение поглощается тканями, причем, чем меньше длина волны, тем выше энергия излучения и больше проникающая способность.



## Дозы ионизирующего излучения

**Доза** – это количественная мера, отражающая действие ионизирующего излучения на облучаемый объект.

**Мощность дозы** – доза в единицу времени.

Существует несколько видов индивидуальных доз:

- экспозиционная;
- поглощенная;
- эквивалентная;
- эффективная;
- ожидаемая эффективная.

**Экспозиционная доза (X)** – это доза  $\gamma$ - или рентгеновского квантового излучения, определяемая числом ионов, образовавшихся в единичном объеме воздуха вследствие его ионизации.

Она характеризуется количеством пар ионов, возникших после облучения воздуха в условиях электрического равновесия, и определяется по формуле:

$$X = dQ / dm,$$

где  $dQ$  – суммарный заряд всех ионов одного знака в объеме воздуха, Кл,

$dm$  – масса объема воздуха, кг.

Системная единица экспозиционной дозы **1 Кл/кг** (C/kg) – это доза  $\gamma$ - или рентгеновского излучения, при которой сумма электрических зарядов всех ионов одного знака в облученном воздухе массой 1 кг равна 1 кулону.

Традиционной единицей экспозиционной дозы является **рентген** – доза рентгеновского или  $\gamma$ -излучения, создающая в 1 см<sup>3</sup> воздуха при 0°C и давлении 760 мм рт.ст.  $2,08 \times 10^9$  пар ионов с зарядом в 1 электростатическую единицу каждого знака.

$$1 \text{ Р} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ Кл/кг}, 1 \text{ Кл/кг} = 3876 \text{ Р}$$

**Поглощенная доза (D)** – это величина энергии ионизирующего излучения, переданная элементарному объему облучаемого тела в пересчете на единицу массы тела в этом объеме.

Поглощенная доза используется для характеристики степени лучевых поражений живых объектов.

Она определяется по формуле:

$$D = de / dm,$$

где  $de$  – средняя энергия, переданная ионизирующим излучением веществу, находящемуся в элементарном объеме, Дж,

$dm$  – масса вещества в элементарном объеме, кг.

Системной единицей поглощенной дозы является *джоуль на килограмм* (Дж/кг) со специальным наименованием **грей** (Гр, Gy).

$$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}.$$

Традиционной единицей является **рад** (rad, rd), аббревиатура слов «radiation absorbed dose».

$$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}, 1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}.$$

При облучении рентгеновским или  $\gamma$ -излучением мягких тканей с экспозиционной дозой 1 Р поглощенная доза будет соответствовать 0,93 рад.

Для замены экспозиционной дозы предлагается **керма** (аббревиатура kinetic energy released in matter - кинетическая энергия, освобожденная в веществе), которая представляет собой отношение суммы начальных кинетических энергий всех заряженных ионизирующих частиц, образовавшихся под действием косвенно ионизирующих излучений в элементарном объеме вещества, к массе вещества в этом объеме.

$$K = d E_{tr} / dm,$$

где  $d E_{tr}$  – энергия, переданная заряженным частицам,

$dm$  – масса вещества в его элементарном объеме.

Керма характеризует источник излучений с точки зрения передачи энергии веществу любого элементного состава.

Единицей кермы, как и поглощенной дозы, является **1 Дж/кг = 1 Гр**.

При низких энергиях излучения керма примерно равна поглощенной дозе, при высоких энергиях – выше поглощенной дозы, поскольку часть энергии уносится из поглощающего объема в форме рентгеновского тормозного излучения или быстрых электронов.

**Эквивалентная доза** (Н) – это доза, поглощенная тканью или органом с учетом взвешивающего коэффициента данного излучения ( $W_R$ ), который иногда называют коэффициентом качества (К) излучения.

$$H_T = D_T \times W_R,$$

где  $D_T$  – поглощенная доза от излучения, усредненная по органу или ткани (T),

$W_R$  – взвешивающий коэффициент для данного вида излучения (R).

Понятие «эквивалентная доза» было введено в связи с тем, что повреждающий эффект различных видов ионизирующих излучений на биологических объектах различен при одинаковых поглощенных дозах. Эквивалентная доза позволяет сопоставить радиационную опасность любого вида ионизирующего излучения с рентгеновским или  $\gamma$ - излучением, принимаемым за единицу (таблица 2.2).

**Таблица 2.2** – Взвешивающие коэффициенты для различных видов ионизирующих излучений ( $W_R$ )

Вид излучения	$W_R$
Рентгеновское излучение	1
Гамма-излучение любых энергий	1
Электроны и позитроны любых энергий	1
Нейтроны с энергией менее 10 кэВ	5
Нейтроны с энергией от 10 кэВ до 100 кэВ	10
Нейтроны с энергией от 100 кэВ до 2 МэВ	20
Нейтроны с энергией от 2 МэВ до 20 МэВ	10
Нейтроны с энергией более 20 МэВ	5
Протоны с энергией более 2 МэВ, кроме протонов отдачи	5
Альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ядра	20

Если на организм действуют несколько различных видов излучения, эквивалентная доза определяется как сумма эквивалентных доз для этих видов излучения с учетом их взвешивающих коэффициентов.

$$H_T = \sum D_T \times W_R$$

Системной единицей (СИ) эквивалентной дозы является **Зиверт** (Зв, Sv).

Для рентгеновского,  $\gamma$ - и  $\beta$ -излучений 1 Зв соответствует поглощенной дозе в 1 Гр.

Традиционная *единица* эквивалентной дозы – **бэр** (биологический эквивалент рада), или rem – аббревиатура от английского «rad equivalent for man» (эквивалент рада для человека).

Бэр – это эквивалентная доза любого вида ионизирующего излучения, которая имеет такую же биологическую эффективность как 1 рад рентгеновского или  $\gamma$ -излучения.

$$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}, 1 \text{ бэр} = 0,01 \text{ Зв}.$$

**Эффективная доза** (E) – это сумма взвешенных эквивалентных доз во всех или отдельных тканях и органах человека с учетом их радиочувствительности, характеризуемой взвешивающими коэффициентами.

$$E = \sum H_T \times W_T$$

Взвешивающие тканевые коэффициенты  $W_T$  являются коэффициентами радиационного риска и отражают естественную склонность органа к малигнизации под воздействием радиации (таблица 2.3).

Эффективная доза имеет особое значение при неравномерном облучении тела и позволяет оценить ущерб здоровью при расчете риска возникновения канцерогенных и генетических эффектов.

**Таблица 2.3** – Взвешивающие коэффициенты для тканей и органов

Ткань, орган	$W_T$	$(\sum W_T)$
Красный костный мозг, толстый кишечник, легкие, желудок, молочная железа, остальные ткани	0,12	(0,72)
Гонады	0,08	(0,08)
Мочевой пузырь, пищевод, печень, щитовидная железа	0,04	(0,16)
Костная поверхность, кожа, головной мозг, слюнные железы	0,01	(0,04)
Всего		1

**Ожидаемая эффективная доза** – это доза, полученная человеком за определенный период времени. Так, доза за 70 лет (средняя продолжительность жизни) определяется как доза за жизнь.

Для характеристики интенсивности ионизирующих излучений в единицу времени используют величину **мощности дозы излучения**.

Различают мощность экспозиционной (Кл/кгс, Р/ч), поглощенной (Гр/с, рад/с), эквивалентной (Зв/ч, бэр/ч) дозы.

В зависимости от мощности и времени воздействия различают следующие виды облучения:

- *кратковременное* (импульсное, в течение нескольких минут);
- *продолжительное* (в течение нескольких дней, недель);
- *хроническое* (в течение нескольких месяцев).

Кроме индивидуальных, в радиационной медицине применяются также коллективные дозы:

- эквивалентная;
- эффективная;
- ожидаемая эффективная дозы, измеряемые в *человеко-зивертах* (чел-Зв).

**Коллективная эквивалентная доза** ( $S_T$ ) – это эквивалентная доза в ткани или органе (Т) у группы лиц.

**Коллективная эффективная доза** (S) – это суммарная эффективная доза у всех облученных. Она используется как показатель коллективного риска возникновения стохастических эффектов.

**Ожидаемая коллективная эффективная доза** представляет собой суммарную эффективную дозу у группы лиц, подвергающихся хроническому облучению за определенное время.

## Дозиметрия и радиометрия

**Дозиметрия** – это определение дозы или ее мощности (т.е. дозы в единицу времени) с помощью дозиметрических приборов.

Обычно дозиметрическими приборами измеряется экспозиционная доза. При определенных условиях поддается измерению и поглощенная доза. Все остальные дозы рассчитываются и оцениваются с использованием данных радиометрии и разнообразных коэффициентов.

Дозиметрические приборы для обнаружения и измерения ионизирующих излучений подразделяются на:

- *измерители мощности дозы* (индикаторы радиоактивности, рентгенометры, радиометры);
- *измерители дозы* (дозиметры).

Для наблюдения за радиационной обстановкой используют измерители мощности дозы, которые могут работать в:

- непрерывном (индикаторы-сигнализаторы) режиме;
- периодическом (приборы радиационной разведки) режиме.

Дозиметрические величины и единицы их измерений представлены в таблице 2.4.

**Таблица 2.4** – Дозиметрические величины и единицы их измерений

Системные единицы (СИ)	Внесистемные единицы	Соотношения между единицами
<i>Поглощенная доза</i>		
Грей (Гр)	рад	1 Гр = 100 рад 1 рад = 0,01 Гр
<i>Мощность поглощенной дозы</i>		
Грей в секунду (Гр/с)	рад в секунду (рад/с)	1 Гр/с = 100 рад/с 1 рад/с = 0,01 Гр/с
<i>Эквивалентная, эффективная доза</i>		
Зиверт (Зв)	бэр	1 Зв = 100 бэр 1 бэр = 0,01 Зв
<i>Мощность эквивалентной, эффективной дозы</i>		
Зиверт в секунду (Зв/с)	бэр в секунду (бэр/с)	1 Зв/с = 100 бэр/с 1 бэр/с = 0,01 Зв/с
<i>Экспозиционная доза</i>		
Кулон на килограмм (Кл/кг)	Рентген (Р)	1 Кл/кг $\approx 3,876 \times 10^3$ Р 1 Р = $2,58 \times 10^{-4}$ Кл/кг
<i>Мощность экспозиционной дозы</i>		
Ампер на килограмм (А/кг)	Рентген в секунду (Р/с)	1 А/кг $\approx 3,876 \times 10^3$ Р/с 1 Р/с = $2,58 \times 10^{-4}$ А/кг

**Радиометрия** – это определение радиоактивного загрязнения поверхностей, одежды, кожных покровов человека, продуктов питания, сырья, кормов, воды, почвы, растительности с помощью радиометров.

Производится радиометрия с целью:

- профилактики поражения человека радиоактивными веществами при их попадании на кожу или внутрь организма;
- принятия решения о возможности действий без индивидуальных средств защиты;
- определения необходимости проведения санитарной обработки и контроля ее эффективности.

Радиометрический контроль проводят непрерывно в ходе пребывания на зараженных участках местности и по выходу из нее.

Радиометрия может быть:

- абсолютной;
- относительной.

Для **абсолютной радиометрии** применяются прямые методы (непосредственное измерение активности источников ионизирующего излучения без использования радиоактивных стандартов).

Непрямые методы, применимые для **относительной радиометрии**, основаны на измерении активности источника в условиях, идентичных предварительно проведенным измерениям стандарта с известной активностью.

Радиометрические величины и единицы их измерений представлены в таблице 2.5.

**Таблица 2.5** – Радиометрические величины и единицы их измерений

Системные единицы (СИ)	Внесистемные единицы	Соотношения между единицами
Беккерель (Бк) – 1 распад в секунду	Кюри (Ки) $3,7 \times 10^{10}$ распадов в секунду	$1 \text{ Бк} \approx 2,7 \times 10^{-11} \text{ Ки}$ $1 \text{ Ки} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Бк}$
<i>Удельная и объемная радиоактивность</i>		
Беккерель на килограмм (Бк/кг)	Кюри на килограмм (Ки/кг)	$1 \text{ Бк} \approx 2,7 \times 10^{-11} \text{ Ки/кг}$ $1 \text{ Ки} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Бк/кг}$
Беккерель на кубический метр (Бк/м <sup>3</sup> )	Кюри на литр (Ки/л)	$1 \text{ Бк/м}^3 = 2,7 \times 10^{-14} \text{ Ки/л}$ $1 \text{ Ки/л} = 3,7 \times 10^{13} \text{ Бк/м}^3$

Для поиска и обнаружения источников  $\alpha$ -,  $\beta$ -, и  $\gamma$ -излучения, измерения мощности эквивалентной, экспозиционной и поглощенной дозы, плотности потока  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучения от загрязненных поверхностей используется дозиметр-радиометр МКС-1117 (рисунок 2.6).



**Рисунок 2.6.** Дозиметр-радиометр МКС-1117

Для измерения мощности эквивалентной дозы, дозы рентгеновского и  $\gamma$ -излучения, плотности потока  $\beta$ -частиц с загрязненных поверхностей используются дозиметры-радиометры МКС-АТ6130 (ри-

сунок 2.7), МКС-АТ6130А, МКС-АТ6130В, МКС-АТ6130С и МКС-АТ6130Д.



**Рисунок 2.7.** Дозиметр-радиометр МКС-АТ6130

Дозиметрия непрерывного, кратковременного и импульсного рентгеновского и  $\gamma$ -излучения производится с помощью многофункциональных дозиметров рентгеновского и  $\gamma$ -излучения ДКС-АТ1121 (рисунок 2.8) и ДКС-АТ1123.



**Рисунок 2.8.** Дозиметр рентгеновского и  $\gamma$ -излучения ДКС-АТ1121

В целях измерения индивидуальной эквивалентной дозы и мощности дозы гамма-излучения применяются индивидуальные дозиметры ДКГ-АТ2503 (рисунок 2.9) и ДКГ-АТ2503А (рисунок 2.10).





**Рисунок 2.9.** Индивидуальный дозиметр ДКГ-АТ2503



**Рисунок 2.10.** Индивидуальный дозиметр ДКГ-АТ2503А

Измерение мощности эквивалента направленной дозы непрерывного рентгеновского излучения с энергией от 5 кэВ обеспечивает прибор для контроля дозовых нагрузок на хрусталик, слизистые оболочки и кожу ДКР-АТ1103М (рисунок 2.11).

**Спектрометрия** – измерение спектра радионуклидов и их активности в любом радиоактивно загрязненном объекте. Для обследования населения, а также оценки дозовых нагрузок на персонал ядерных предприятий используются **спектрометры излучения человека** (СИЧ), предназначенные для измерения содержания радиоактивных изотопов в организме человека.



**Рисунок 2.11.** Дозиметр рентгеновского излучения ДКР-АТ1103М

Например, экспресс-контроль и измерение активности гамма-излучающих радионуклидов в теле человека, а также оценка дозы внутреннего облучения осуществляется с помощью СИЧ СКГ-АТ1316 (рисунок 2.12), определение содержания  $I^{131}$  и  $I^{133}$  в щитовидной железе человека – с помощью стационарных сцинтилляционных СИЧ СКГ-АТ1322 и СКГ-АТ1322/1 (рисунок 2.13).



**Рисунок 2.12.** Спектрометр излучения человека СКГ-АТ1316

1 – персональная ЭВМ; 2 – диагностическое кресло с встроенными детекторами (сцинтилляторами)



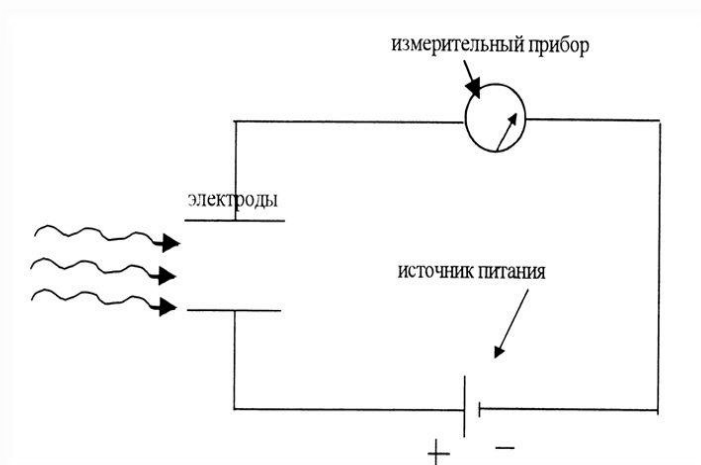
**Рисунок 2.13.** Спектрометр излучения человека СКГ-АТ1322/1

В методах регистрации ионизирующих излучений:

- ионизационном;
- сцинтилляционном;
- люминесцентном;
- фотодозиметрическом;
- химическом

также используют дозиметрические приборы.

**Ионизационный** метод заключается в способности ионизации газа в камере регистрационного прибора, которую вызывают электроны, освобождающиеся под действием фотонного излучения. При контакте электронов с измерительными электродами возникает ток, по величине которого оценивают степень ионизации газа (величину заряда ионов, возникающих под действием ионизирующего излучения) (рисунок 2.14).



**Рисунок 2.14.** Простейшая схема газового детектора

На ионизационном методе основано измерение плотности потоков частиц, для которого используют пропорциональные счетчики и счетчики Гейгера-Мюллера (рисунок 2.15), мощности дозы и дозы излучения с помощью ионизационных камер.

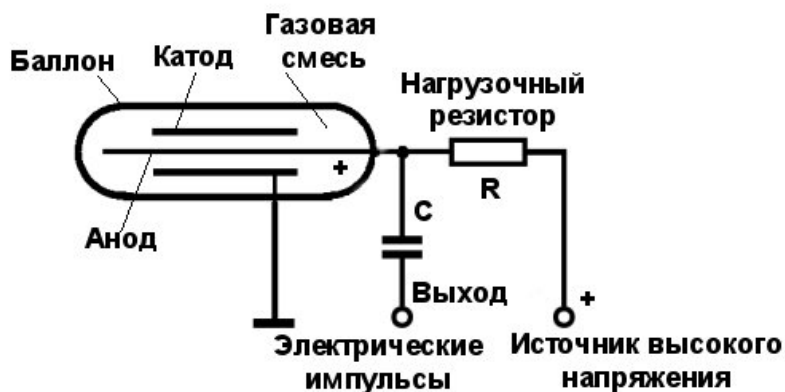


Рисунок 2.15. Счетчик Гейгера-Мюллера

**Сцинтилляционный** метод основан на регистрации вспышек света, которые возникают в сцинтилляторе (рисунок 2.16) при взаимодействии ионизирующего излучения, например с антраценом, сернистым цинком, стильбеном. Данный метод используется для измерения фотонного излучения, потока нейтронов,  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц.

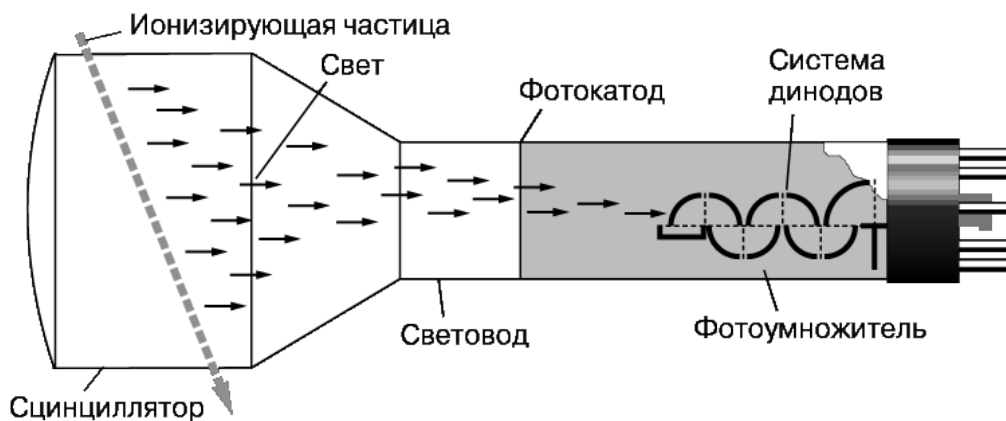


Рисунок 2.16. Схема сцинтилляционного счетчика

**Люминесцентный** метод заключается в способности ионизирующего излучения изменять положение электрозаряженных частиц в кристаллах и стеклах твердых изоляторов. В результате захвата

частиц электрическим полем кристаллической решетки образуются новые энергетические уровни, на которых происходит квантовый переход. При этом изменяются оптические свойства кристаллов или стекла, приводя к люминесцентному свечению под ультрафиолетовым светом или при нагреве.

**Фотодозиметрический** метод основан на образовании атомов металлического серебра в кристаллах бромида серебра, взвешенного в слое желатина, под действием ионизирующего излучения. При этом на фотопленке после ее проявления и фиксации наблюдается почернение фотоэмульсии, плотность которого зависит от экспозиционной дозы и измеряется денситометром.

**Химический** метод основан на измерении числа молекул или ионов (радиационно-химический выход), образовавшихся или изменившихся при поглощении излучения веществом.

Наиболее часто используются ферросульфатные и хининовые дозиметры на основе окислительно-восстановительных реакций.

## Источники ионизирующих излучений

Различают следующие источники ионизирующих излучений:

- природные;
- искусственные, созданные человеком.

**Природные источники** ионизирующих излучений в свою очередь делятся на источники:

- земного;
- внеземного (космического) происхождения.

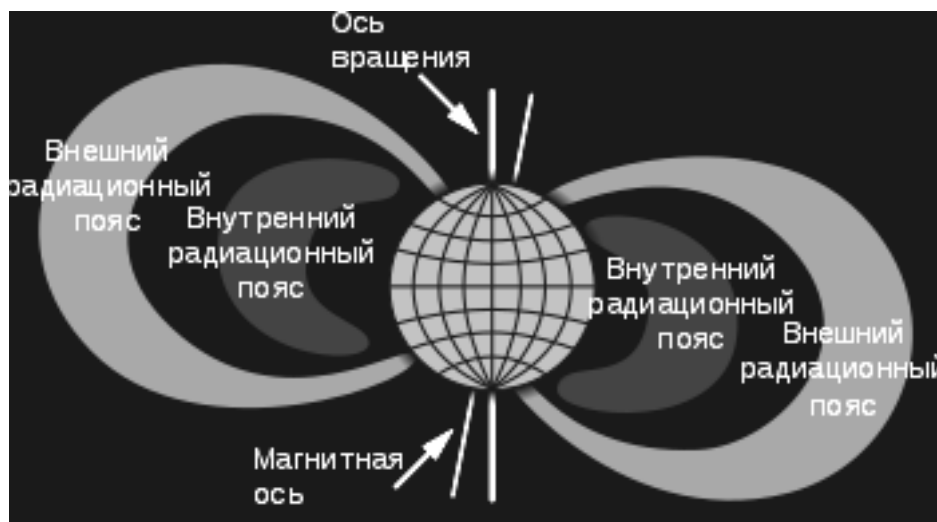
Источником ионизирующих излучений **внеземного происхождения** является **первичное космическое излучение**, которое в окрестности Земли состоит из *галактического космического излучения*, генерированного в удаленных от Земли объектах и *солнечных космических лучей*.

Средняя энергия космического излучения примерно  $10^8$ - $10^9$  эВ, оно обладает большой проникающей способностью.

Первичное космическое излучение состоит из протонов (92 %),  $\alpha$ -частиц (7 %), ядер атомов лития, бериллия, бора, углерода, азота, кислорода и других элементов (около 1%).

Атмосфера служит своеобразным щитом, предохраняющим биологические объекты от воздействия космических частиц, поэтому лишь немногие частицы достигают поверхности Земли. Магнитное поле Земли также заметно влияет на первичное излучение,

препятствуя вхождению в атмосферу низкоэнергетических частиц. В магнитном поле Земли существуют области, в которые заряженные частицы (протоны и электроны) не могут ни влетать, ни вылетать из них (*магнитные ловушки*). Такие области называют *радиационными поясами Земли* (рисунок 2.17).



**Рисунок 2.17.** Схема внутреннего и внешнего радиационных поясов

При падении космических частиц на поверхность Земли они взаимодействуют с атомами и молекулами атмосферы. Возникает **вторичное космическое излучение**. При этом происходят электронно-фотонные и электронно-ядерные процессы взаимодействия, порождаются фотоны, которые образуют пары электронов и позитронов, возникают протоны, нейтроны, мюоны, пионы и под влиянием нейтронов образуются космогенные радионуклиды - C-14, H-3, P-32, S-35, Be-7, Na-22, Na-24 и другие.

Следует отметить, что уровень космического излучения в определенной степени зависит от высоты над уровнем моря, геомагнитной широты, возрастая от экватора к полюсам. Космическое излучение на уровне моря примерно в 100 раз менее интенсивно, чем на границе атмосферы, а Северный и Южный полюса получают больше ионизирующих излучений, чем экваториальные области за счет магнитного поля Земли.

Человек, проживающий на уровне моря, за счет источников ионизирующего излучения внеземного происхождения получает 0,315

мЗв/год, в том числе 0,3 мЗв за счет внешнего и 0,015 мЗв за счет внутреннего облучения.

Для разных мест земного шара уровни радиации неодинаковы, так как зависят от концентрации радионуклидов в том или ином участке земной коры. Более высоким содержанием радионуклидов характеризуются вулканические породы (гранит, базальт), в осадочных породах (известняк, песчаник) радиоактивных элементов гораздо меньше (таблица 2.6).

**Таблица 2.6** – Содержание урана, тория и радия в породах и почвах

Тип породы, почвы	Активность U-238, Бк/кг	Активность Th-232, Бк/кг	Активность Ra-226, Бк/кг
<i>Вулканические:</i>			
Гранит	59	81,4	96 - 114
<i>Осадочные:</i>			
Сланцы	44	44,4	14,8
<i>Почвы:</i>			
Черноземы	21	35,8	
Дерново-подзолистые	15	22,2	

Самые высокие уровни земной радиации отмечены в Бразилии на пляжах Гуарапари – до 175 мЗв/год, а также в монацитовых песках на юго-западе Индии. Высокое содержание радионуклидов уранового ряда характерно для Скандинавских стран и Англии.

Средняя эффективная доза внешнего облучения, которую человек получает от земных источников естественной радиации за год, равна 0,35 мЗв, в том числе 0,09 мЗв за счет радионуклидов уранового ряда и 0,14 мЗв за счет радионуклидов ториевого ряда. Продукты распада урана и тория по пищевым цепочкам, а также с воздухом и водой поступают в организм человека, обуславливая внутреннее облучение: за счет семейства урана эффективная доза составляет 0,95 мЗв/год, за счет семейства тория – 0,19 мЗв/год.

Естественные источники ионизирующего излучения **земного происхождения** представлены *радионуклидами, входящими и не входящими в радиоактивные ряды.*

**Радиоактивный ряд** – это последовательность радионуклидов, образующихся в результате радиоактивного распада каждого предшествующего радионуклида с образованием в конце распада стабильного элемента.

Наиболее долгоживущие изотопы называются *начальными* для каждого из радиоактивных рядов.

Существует *ториевый*, *два урановых* и *нептуниевый* радиоактивные ряды.

В *ториевом* ряду (рисунок 2.18) наиболее долгоживущий изотоп – торий-232 (Th-232),  $T = 1,4 \times 10^{10}$  лет.

В *первом урановом* ряду (рисунок 2.19) – уран-238 (U-238),  $T = 4,5 \times 10^9$  лет.

Во *втором урановом* ряду (рисунок 2.20) – уран-235 (U-235),  $T = 7 \times 10^8$  лет.

В *нептуниевом* ряду (рисунок 2.21) – нептуний-237 (Np-237),  $T = 2,2 \times 10^6$  лет.

В настоящий момент максимально распался изотоп Np-237, по большей части – U-235, мало – U-238, в связи с чем в земной коре U-238 в 140 раз больше, чем U-235. Th-232 радиоактивному распаду практически не подвергся.

Значительную дозу облучения человека формируют промежуточные продукты распада – радиоактивные изотопы радия, радона, полония, висмута, свинца.

Наиболее широко распространен в природе **Радий-226** (Ra-226). Он претерпевает  $\alpha$ -распад (рисунок 2.22) с образованием Rn-222,  $T = 1620$  лет. Может поступать в организм пероральным (коэффициент всасывания в желудочно-кишечном тракте – 0,2), ингаляционным и перкутантным путем.

Источником радия для человека являются зерновые культуры, хлеб, куриные яйца.

Среднее поступление с жидкостями и пищей –  $2,3 \times 10^{-12}$  г/сут.

Радий депонируется в костной ткани, из которой выводится с  $T_6$  (время, в течение которого из организма выводится половина введенного вещества), равным 17,13 лет.

Основной вклад в естественную радиоактивность атмосферного воздуха и уровни облучения человека за счет естественных источников радиации вносит **Радон-222** (Rn-222), который в результате  $\alpha$ -распада образует Po-218 ( $T$  Rn-222 3,8 суток).

Радон существует в виде трех изотопов:

- радон-222 ( $T = 3,8$  дня, ряд распада U-238);
- радон-220, или торон, ( $T = 55$  с, ряд распада Th-232);
- радон-219, или актинон, ( $T = 4$  с, ряд распада U-235), являющихся  $\alpha$ -излучателями.



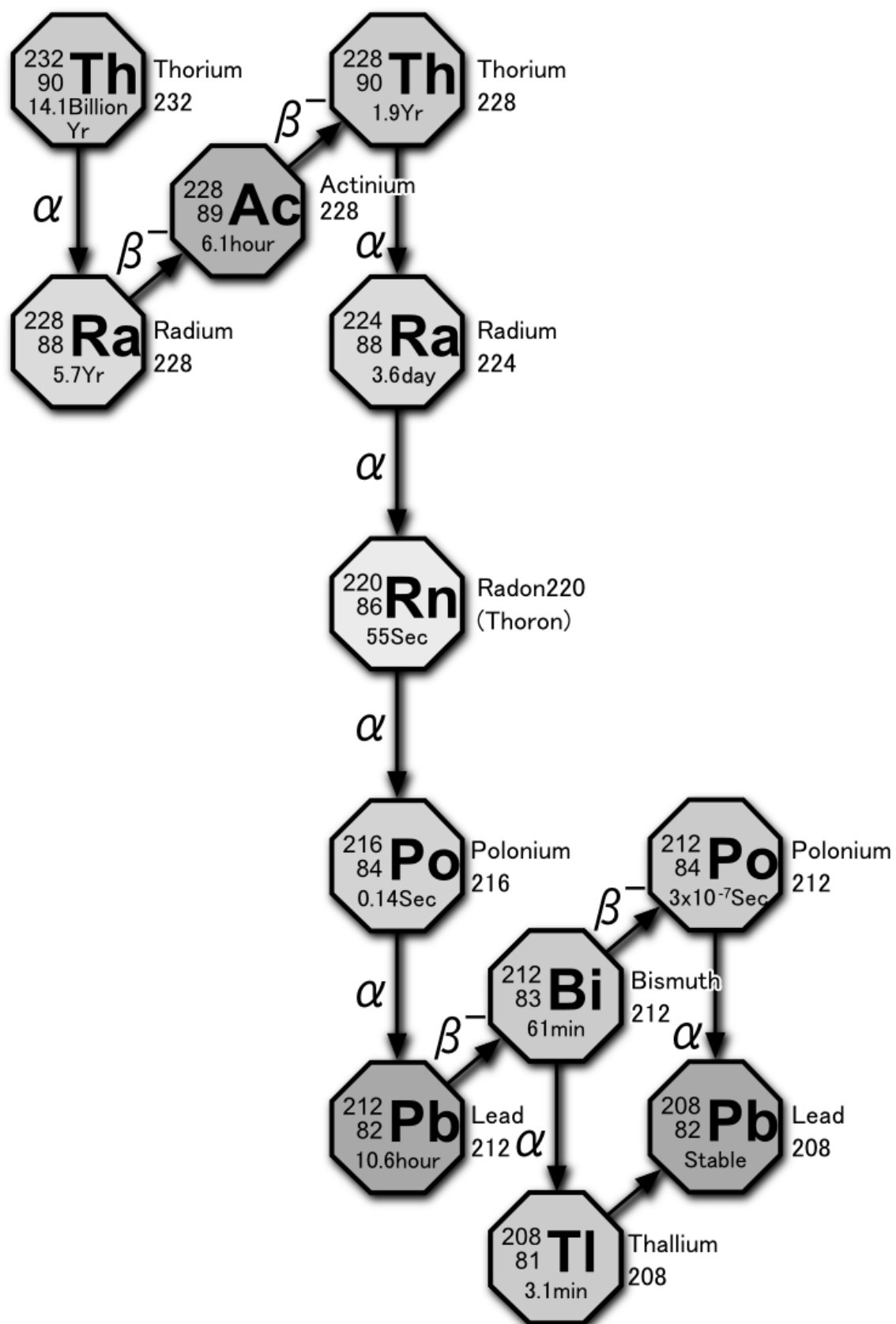


Рисунок 2.18. Ториевый радиоактивный ряд

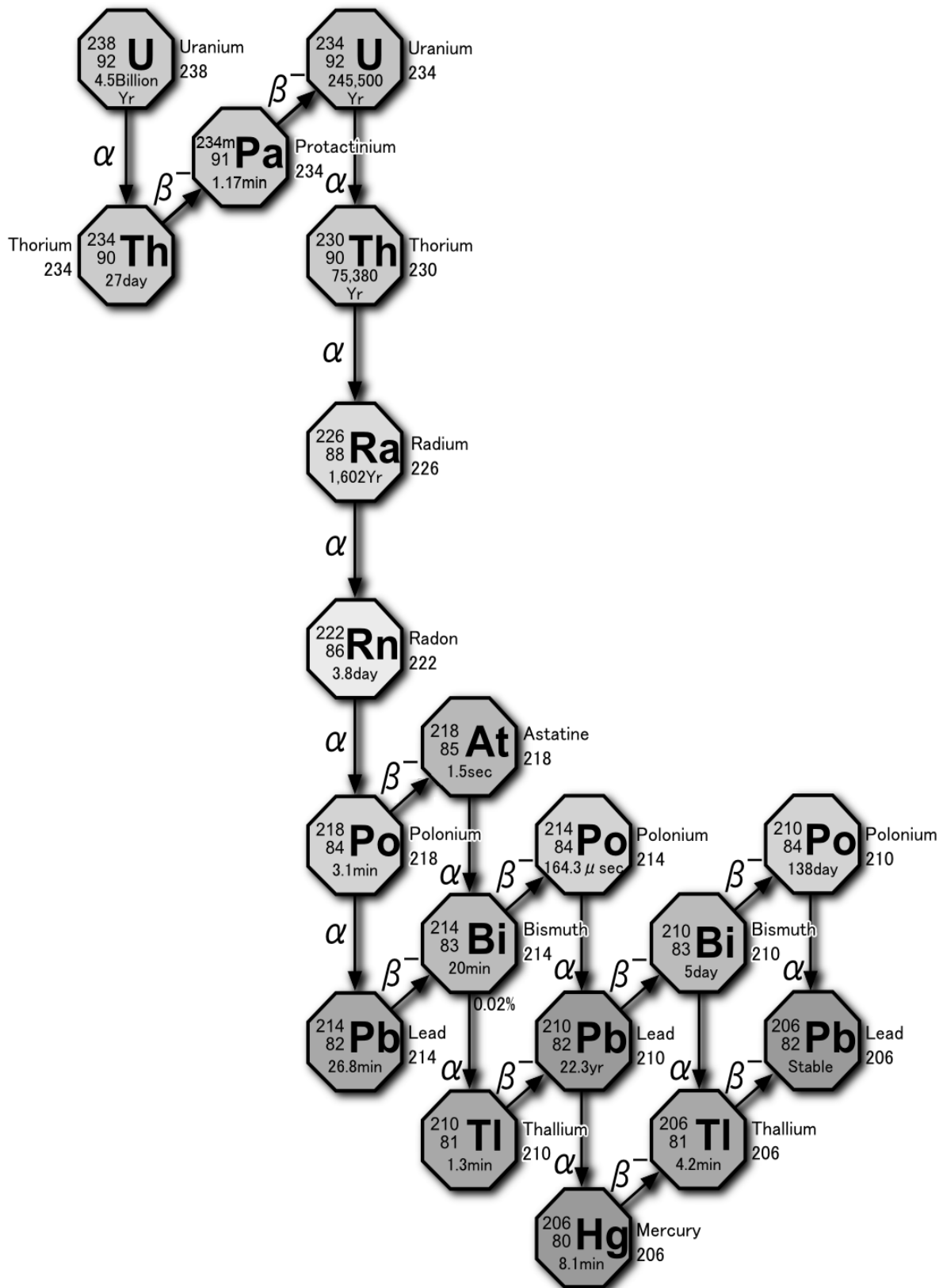


Рисунок 2.19. Первый урановый радиоактивный ряд

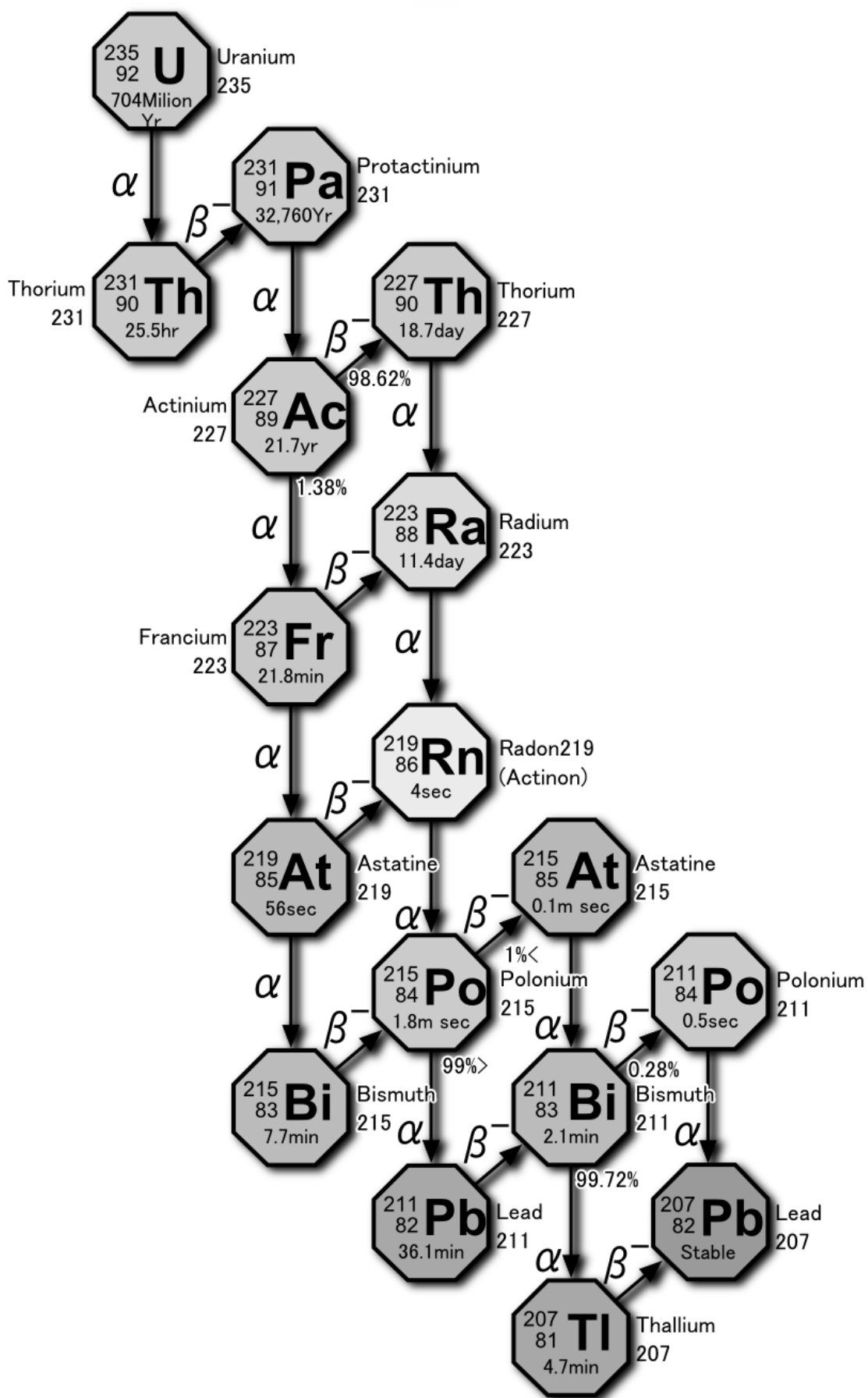


Рисунок 2.20. Второй урановый радиоактивный ряд

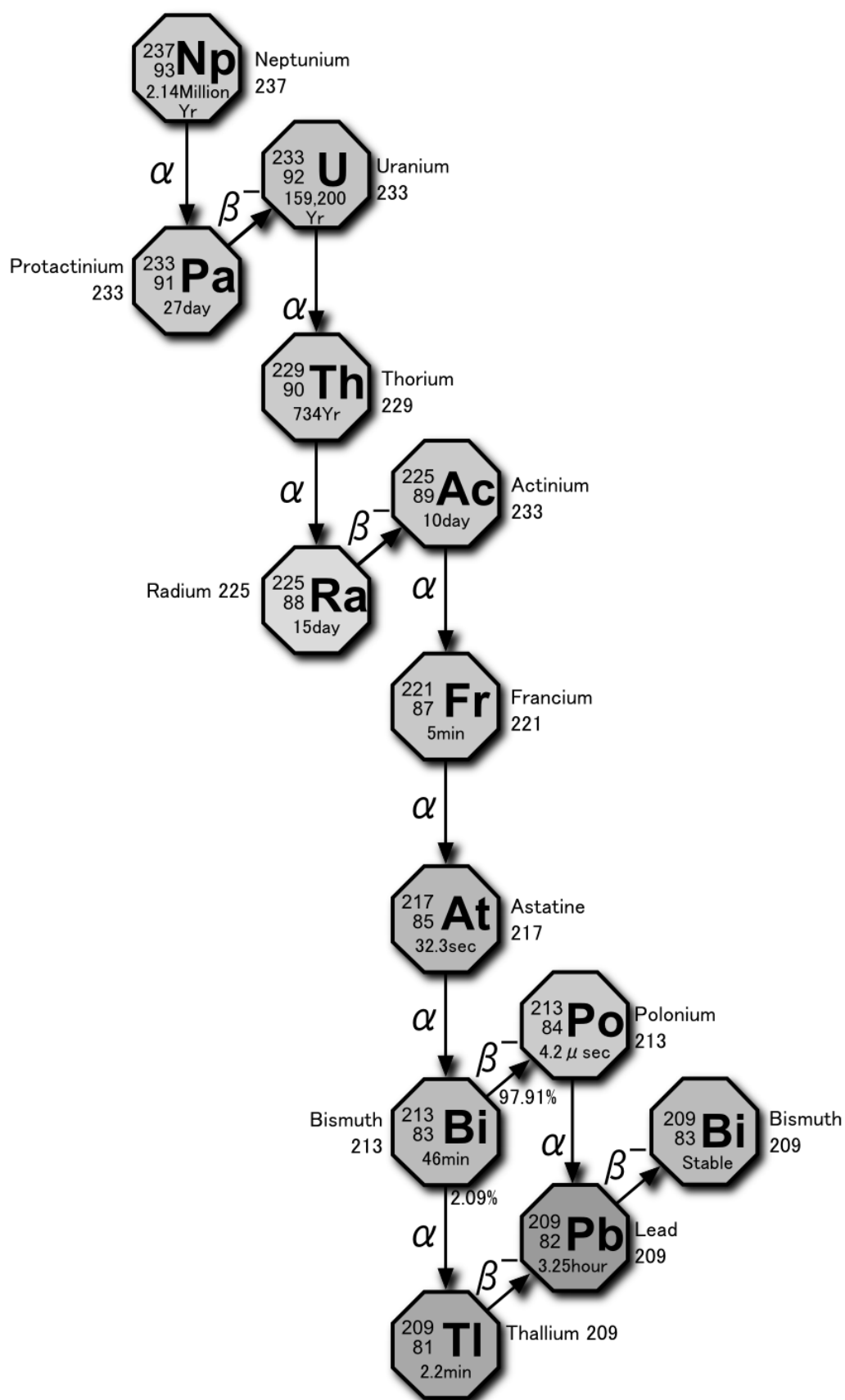
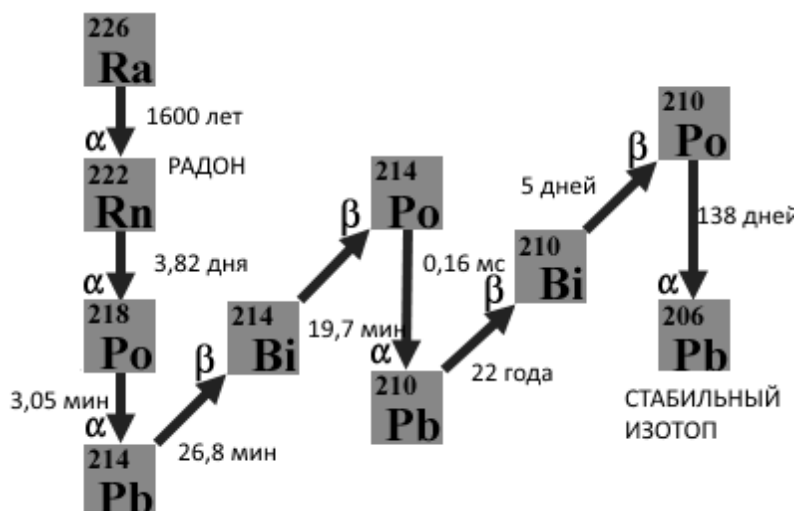


Рисунок 2.21. Нептуниевый радиоактивный ряд  
Радий - альфа



**Рисунок 2.22.** Цепочка распада радия-226

Основным путем поступления в организм радона и продуктов его распада является *ингаляционный*. Также радон может поступать *пероральным* (через желудочно-кишечный тракт) путем с водой для питья и *перкутанным* (через кожу) путем при приеме радоновых ванн. Выведение радона осуществляется главным образом через легкие.

Основными источниками радона являются грунт, строительные материалы, грунтовые воды, природный газ, уголь, шлам, образующийся при добыче фосфорных удобрений, растения, геотермальные электростанции, предприятия ядерного топливного цикла.

В атмосферу радон поступает из почвы и грунтовых пород.

В Беларуси около 40 % территории являются потенциально радоноопасными.

Высокая концентрация радона в воздухе может увеличивать риск заболеваемости раком легких и лейкозом (таблица 2.7).

**Таблица 2.7** – Риск возникновения рака легких в зависимости от концентрации радона

Концентрация радона, кБк/м <sup>3</sup>	Риск у курящих, ‰	Риск у некурящих, ‰	Риск у всего населения, ‰
20	10	1	3
100	50	5	15
200	100	10	30
400	200	20	60

**Полоний-210** (Po-210) подвергается  $\alpha$ -распаду с образованием стабильного Pb-206, T равен 138,4 суток, коэффициент всасывания из желудочно-кишечного тракта – 0,2. Поступает пероральным и ингаляционным путями.

В среднем за сутки в организм человека с пищей поступает 0,037-0,37 Бк Po-210. Депонируется в печени, почках, селезенке, костном мозге.

Курение увеличивает поступление Po-210 в организм человека: в легких курильщика, выкуривающего 10-60 сигарет в сутки, концентрации Po-210 в 2-9 раз выше, чем у некурящих и соответствует дозам 0,027-0,04 мГр/год.

Из организма человека Po-210 выводится с  $T_6$  80 суток с мочой, калом и выдыхаемым воздухом.

**Свинец-210** (Pb-210) подвергается  $\beta$ -распаду с образованием Bi-210, T – 22,3 года, коэффициент всасывания в желудочно-кишечном тракте – 0,2. Поступает пероральным и ингаляционным путями.

Изотоп связан с обменом кальция и фосфора, накапливается в костях.

Выводится с  $T_6$  12 – 10000 суток с мочой, калом и выдыхаемым воздухом.

В группе *радионуклидов, не входящих в радиоактивные ряды*, содержится 11 долгоживущих радионуклидов с периодом полураспада  $10^7$ - $10^{15}$  лет.

Наибольший вклад в формирование эффективной дозы вносят K-40 и Rb-87.

**Калий-40** (K-40) претерпевает  $\beta$ -распад (рисунок 2.23), T –  $1,32 \times 10^9$  лет.

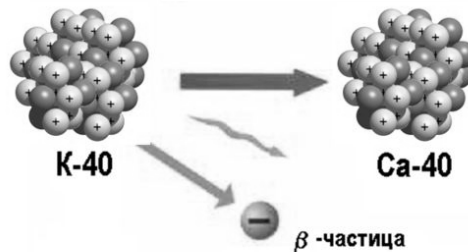
В природе его доля около 0,01%. K-40 формирует годовую эффективную дозу 0,12 мЗв за счет внешнего облучения и 0,18 мЗв – за счет внутреннего облучения.

K-40 обуславливает активность поверхностного слоя почвы 1-2 Ки/км<sup>2</sup>, растительного покрова – около  $10^{-8}$  Ки/кг, пищевых продуктов –  $10^{-9}$  Ки/кг (сырых продуктов). Наибольшая активность K-40 регистрируется в клюкве, орехах, фасоли, картофеле.

K-40 поступает в организм с пищей и водой, практически полностью всасывается из желудочно-кишечного тракта и равномерно распределяется в органах и тканях,  $T_6$  равен 58 суток. Выводится через почки и кишечник.

Суточная потребность человека в калии составляет около 3 г. Содержание калия в красном костном мозге 4 г/кг, средняя актив-

ность К-40 – 121 Бк/кг, в скелетных мышцах – 3 г/кг и 90 Бк/кг соответственно. Депонируется в мышечной ткани, головном мозге, печени, легких, жировой и костной ткани.



**Рисунок 2.23.** Бета-распад калия-40

**Рубидий-87** (Rb-87) входит в состав продуктов деления урана. Он претерпевает  $\beta$ -превращение,  $T - 4,8 \times 10^{10}$  лет.

При поступлении  $\text{per os}$  практически полностью всасывается из желудочно-кишечного тракта и равномерно распределяется в тканях и органах.

$T_6$  из мягких тканей человека в среднем составляет 44 дня. Выводится в основном через почки.

Радиоактивные изотопы, входящие в радиоактивные ряды, родоначальниками которых являются  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{235}\text{U}$ , генетически не связанные с ними  $^{40}\text{K}$ ,  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ , а также непрерывно возникающие в атмосфере в результате ядерных реакций под воздействием космических лучей космогенные радионуклиды присутствуют в биосфере и обуславливают ее **природную радиоактивность**. Различают природную радиоактивность воздуха, воды, почвы, флоры, фауны и человека.

**Радиоактивность воздуха** обусловлена космогенными радионуклидами, возникающими в атмосфере в результате действия первичного космического излучения, радиоактивных газов, поступающих из верхних слоев земной коры, их дочерних продуктов, а также радиоактивных изотопов, поступающих в результате жизнедеятельности человека и животных.

Из космогенных радиоактивных изотопов в воздухе ведущее значение принадлежит радиоактивному углероду ( $^{14}\text{C}$ ). К радиоактивным газам, поступающим из верхних слоев земной поверхности, относятся промежуточные газообразные продукты распада радиоактивных веществ (эманации) образующиеся при распаде дочерних

продуктов урана (радон-222), тория (торон-220) и актиния (актинон-219), из них наибольшее значение имеет радон-222.

Природная радиоактивность воздуха колеблется в пределах  $0,2...4,4 \times 10^{-13}$  Ки/л. Радиоактивность воздуха по радиоактивному углероду в среднем равна  $0,013 \times 10^{-13}$  Ки/л. Активность атмосферного воздуха над сушей по радону в среднем составляет  $1,3 \times 10^{-13}$  Ки/л. Вклад в суммарную активность воздуха торона и актинона незначителен.

Радиоактивные эманации при своем распаде дают начало коротко- и долгоживущим изотопам полония, висмута и свинца. Удельная  $\alpha$ -активность воздуха по короткоживущим дочерним продуктам эманаций в среднем составляет  $0,6 \times 10^{-13}$  Ки/л,  $\beta$ -активность –  $1,6 \times 10^{-13}$  Ки/л.

**Радиоактивность природных вод** зависит от количества растворимых радиоактивных веществ в составе грунта, омываемого этой водой.

Радиоактивность подземных вод в основном обусловлена присутствием  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{222}\text{Rn}$ . Она колеблется в пределах  $23...56000 \times 10^{-13}$  Ки/л. Радиоактивность подземной воды в осадочных породах, используемой для водоснабжения, по радону-226 равна  $20 \times 10^{-13}$  Ки/л, радону-222 –  $500 \times 10^{-13}$  Ки/л. Радиоактивность питьевой воды по цезию не должна превышать  $27000 \times 10^{-13}$  Ки/л.

Радиоактивность речной воды обусловлена в основном присутствием  $^{40}\text{K}$  и  $^{226}\text{Ra}$  и находится в пределах  $15...170 \times 10^{-13}$  Ки/л. Радиоактивность озерной воды особенно высока в солевых озерах ( $100000 \times 10^{-13}$  Ки/л).

**Радиоактивность почвы** зависит от ее состава. Почвы, возникающие из кислых магматических пород, содержат относительно большие количества урана, радия, тория, калия. Глинистые почвы обычно богаче радиоактивными элементами, чем песчаные. Радиоактивность почвы обусловлена радионуклидами, входящими и не входящими в радиоактивные ряды, наибольшее значение имеют калий-40, радий-226. Радиоактивность почвы колеблется в пределах  $25000...300000 \times 10^{-13}$  Ки/кг ( $0,3-3,5$  Ки/кг), по калию-40 в среднем составляет  $150000 \times 10^{-13}$  Ки/кг.

Радиоактивность растительного и животного мира обусловлена практически всеми теми радиоактивными изотопами, которые встречаются в природе. Главное место по величине создаваемой активности занимает изотоп калия -  $^{40}\text{K}$ . Количество калия в растительных организмах по сравнению с его содержанием в земной коре меньше в 3-



10 раз, в животных организмах – меньше в 10-15 раз. На порядок меньше удельная радиоактивность биомассы по радиоактивному углероду, по тритию - ничтожна. Удельная активность  $^{210}\text{Rb}$  и  $^{210}\text{Po}$  в растительной пище составляет 0,02-0,37 Бк/кг, в продуктах питания животного происхождения 0,13–13,7 мБк/кг.

**Радиоактивность тела человека** обусловлена присутствием в организме всех встречающихся в биосфере радиоактивных изотопов и отмечается на уровне  $0,5...3 \times 10^{-9}$  Ки/кг (таблица 2.8).

**Таблица 2.8** – Содержание естественных радиоактивных изотопов в теле человека

Радиоактивный изотоп	Содержание радиоактивного изотопа, г, без стабильного носителя	Радиоактивность, Ки
$^{40}\text{K}$	$8,3 \times 10^{-2}$	$6 \times 10^{-7}$
$^{14}\text{C}$	$2 \times 10^{-3}$	$8,9 \times 10^{-8}$
$^{87}\text{Rb}$	$7 \times 10^{-3}$	$4,6 \times 10^{-10}$
$^3\text{H}$	$8 \times 10^{-15}$	$7,6 \times 10^{-11}$
$^{235}\text{U}$	$5 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-11}$
$^{232}\text{Th}$	$7 \times 10^{-6}$	$7,9 \times 10^{-12}$
$^{238}\text{U}$	$7 \times 10^{-4}$	$2,4 \times 10^{-10}$

Суммарное содержание калия в организме взрослого человека массой 70 кг составляет 0,19 % (130 г). Особенно богаты калием ткани и органы, обладающие высокой функциональной активностью - скелетная мускулатура, нервная ткань, сердце, печень, селезенка (таблица 2.9).

**Таблица 2.9** – Содержание калия и  $^{40}\text{K}$  в отдельных органах и тканях тела человека

Орган или ткань	Содержание калия, %	Удельная радиоактивность $\times 10^{-9}$ , Ки/кг
Мышцы	0,360	2,9
Головной мозг	0,330	2,4
Печень	0,215	1,7
Легкие	0,150	1,2
Жировая ткань	0,060	0,5
Костная ткань	0,061	0,5

Общее содержание углерода в теле взрослого человека достигает 18 %, то есть около 12,6 кг. Учитывая равномерное распределение углерода в тканях, можно считать, что удельная радиоактивность их по  $^{14}\text{C}$  составляет  $1,4 \times 10^{-9}$  Ки/кг.

Количество трития в организме практически постоянно и определяется содержанием стабильного изотопа (около 10,2 % в мышцах и 6,4 % в костях). Удельная активность мягких тканей тела человека за счет  $^3\text{H}$  составляет  $1,5 \times 10^{-11}$  Ки/кг, а костей –  $0,92 \times 10^{-11}$  Ки/кг.

Радий накапливается преимущественно в костной ткани (таблица 2.10).

**Таблица 2.10** – Содержание радия в органах и тканях тела человека

Орган или ткань	Удельная радиоактивность, $\times 10^{-12}$ , Ки/кг
Костная ткань	5,4–9,7
Печень	2–3,4
Легкие	1,2–3,5
Мышцы	1,4–2,5
Почки	0,9
Яичники	0,3–0,6

Основная часть  $^{210}\text{Pb}$  (до 70 %) содержится в скелете. Его удельная активность составляет в костной ткани – 13-110 нКи/кг, в мягких тканях – 0,2-18 нКи/кг. Общее содержание урана в организме равно  $8 \times 10^{-6}$  –  $1 \times 10^{-5}$  г/г. До 40 % от суммарной  $\alpha$ -активности тела человека приходится на долю тория и его дочерних продуктов. При концентрации радона во вдыхаемом воздухе  $3 \times 10^{-13}$  Ки/л активность мягких тканей может достигать  $1,3 \times 10^{-12}$  Ки/кг.

К основным **искусственным источникам** ионизирующих излучений относятся:

- источники, используемые в медицине;
- глобальные выпадения радионуклидов;
- стройматериалы;
- телевидение;
- авиация (рисунок 2.24).

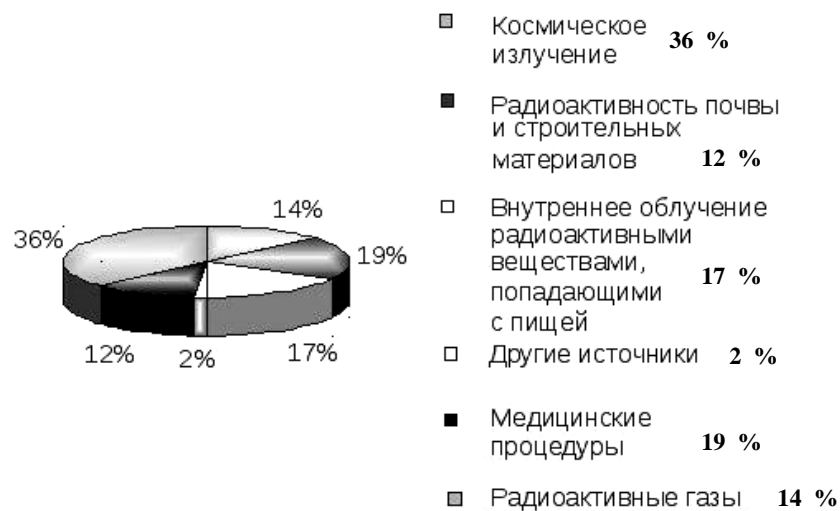
Более существенными являются **источники, используемые в медицине**, основной вклад в облучение вносит медицинская диагностика.

В медицине широко применяются:

- ✓ установки с нейтронными,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучателями;

- ✓ рентгеновские аппараты;
- ✓ ускорители заряженных частиц;
- ✓ радиоизотопы.

На 1000 жителей развитых стран в год приходится 300-900 рентгенологических исследований, не считая рентгенологических исследований зубов и массовой флюорографии. Среднемировое значение индивидуальной дозы облучения всего тела вследствие медицинских процедур составляет 0,4-1,0 мЗв/год. В 1996 г. облучение населения Беларуси за счет медицинских источников составляло 2,0-2,5 мЗв/год, индивидуальные дозы работников рентгенкабинетов и радиоизотопных лабораторий – 2,5-6,3 мЗв/год.



**Рисунок 2.24.** Дозы ионизирующего излучения, получаемые человеком из различных источников

**Стройматериалы** формируют эффективную дозу в 0,1 мЗв/год.

В зависимости от концентрации К-40, Ra-226, U-238 и Th-232 в различных стройматериалах мощность дозы в домах колеблется в пределах 0,04-0,12 мкГр/ч. В кирпичных и бетонных зданиях мощность дозы в 2-3 раза больше, чем в деревянных домах, где она обычно составляет 0,04-0,05 мкГр/ч. Необходимо отметить, что, чем больше отходов производства пошло на изготовление стройматериала, тем выше может быть его удельная активность (таблица 2.11).

**Телевидение** является источником мягкого рентгеновского излучения. Мощность эффективной дозы облучения всего тела от цветного телевизора на расстоянии 250 см от экрана составляет  $2,5 \times 10^{-3}$

мкЗв/ч. За счет телевидения формируется средняя взвешенная годовая эффективная доза 0,01 мЗв.

**Таблица 2.11** – Удельная активность Ra-226 и Th-232 в различных стройматериалах, (Бк/кг)

Стройматериал	Ra-226	Th-232
Дерево	0,3 - 0,5	0,2 - 1,2
Кирпич	33 - 152	21 - 178
Бетон	11 - 80	9 - 105
Фосфогипс	24 - 255	3 - 22
Газобетон на основе квасцовых глинистых сланцев	320 - 2620	24 - 115

Использование *авиации* увеличивает облучение человека космическими лучами, что ведет к формированию годовой эффективной дозы 0,05 мЗв. Во время полета на самолете мощность дозы облучения всего тела составляет 1,35 мкЗв/ч на высоте 8 км. За 7 час 25 мин трансатлантического перелета Нью-Йорк – Париж на турбореактивном самолете пассажир получает около 50 мкЗв.

**Глобальные выпадения радионуклидов** – это выпадения, обнаруживаемые вдали от места выброса практически в любой точке Земного шара. Это происходит при попадании радионуклидов в верхние слои тропосферы и стратосферу. В тропосфере радионуклиды могут находиться до 30 суток, в стратосфере – до нескольких месяцев или лет, а затем долгое время выпадают в различном количестве на различные участки поверхности всего Земного шара.

Различают глобальные выпадения радионуклидов:

- за счет испытаний ядерного оружия;
- за счет деятельности предприятий ядерно-топливного цикла.

Особенно значимы *глобальные выпадения радионуклидов за счет аварий на АЭС*.

*Испытания ядерного оружия* в атмосфере начались с 1945 г. с максимумом в 1954-1958 гг., когда взрывы проводили США, СССР и Великобритания, и в 1961-1962 гг., когда взрывы проводили в основном США и СССР.

В настоящее время эффективная доза от испытаний ядерного оружия составляет менее 1 % от дозы за счет естественных источников излучения и оценивается в 0,02 мЗв/год. Вклад в ожидаемую коллективную эффективную дозу облучения населения от ядерных взрывов, превышающий 1 %, дают только радионуклиды C-14, Cs-137, Zr-

95, Sr-90. Максимальное значение в ближайшее время после взрыва имели радионуклиды с  $T$  от нескольких суток до 2 месяцев: I-131, Ba-140, Sr-89, Zr-95. Радионуклиды Cs-137 и Sr-90 ( $T$  примерно 30 лет) вносили вклад в облучение приблизительно до конца XX века, C-14 ( $T = 5730$  лет) является источником излучений в настоящее время и в отдаленном будущем.

*Глобальные выпадения радионуклидов за счет деятельности предприятий ядерно-топливного цикла незначительны.* В настоящее время эффективная доза за счет использования ядерной энергетики оценивается в 0,1 мкЗв/год. При нормальной эксплуатации АЭС мощностью 1000 МВт в сотни раз менее опасна по выбросам природных радионуклидов K-40, U-238, Th-232, Pb-210, Po-210, чем угольная ТЭС той же мощности.

Загрязнение окружающей среды радионуклидами происходит на всех стадиях ядерного топливного цикла:

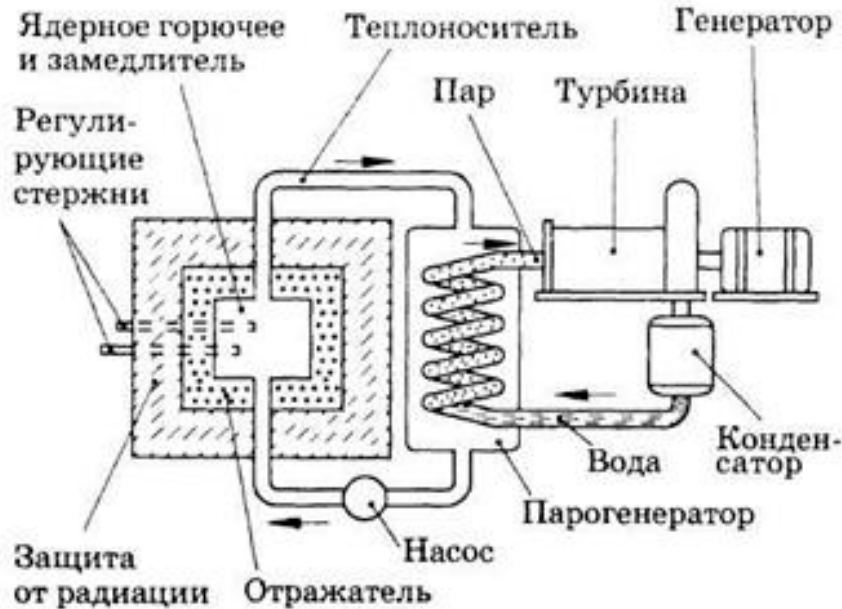
- добыча урановой руды;
- переработка ее в обогащенное U-235 ядерное топливо;
- производство тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), состоящих из урана в металлической, карбидной или оксидной форме в оболочке из циркония, магниевом сплаве или нержавеющей стали;
- использование ТВЭЛов на АЭС;
- переработка отработанного ядерного топлива;
- переработка и захоронение образующихся радиоактивных отходов;
- транспортировка радиоактивных материалов для обеспечения всех стадий.

Наибольший вклад в загрязнение среды вносят переработка отработанного ядерного топлива на радиохимических заводах (основные загрязнители C-14, Kr-95, H-3, I-129), удаление после очистки газообразных и жидких отходов (основные загрязнители I-131, Cs-137, Cs-134, Sr-90, а также радиоактивные инертные газы) при нормальной работе реактора АЭС.

Мировая ядерная энергетика достигла к настоящему времени впечатляющих результатов. Выработка электроэнергии атомными электростанциями составляет почти 20 % от общей выработки электроэнергии, а в ряде стран электроэнергия, вырабатываемая на атомных электростанциях, стала основной.

Основным типом энергетического реактора в мировой атомной энергетике является *реактор на тепловых нейтронах* (рисунок 2.25).

Существует несколько различных типов реакторов на тепловых нейтронах в зависимости от вида топлива, теплоносителя, замедлителя.



**Рисунок 2.25.** Основные элементы ядерного реактора

Среди ядерных реакторов в мире наиболее распространенным типом являются *реакторы типа PWR* (pressurized water reactor), которых по состоянию на 2000 г. насчитывалось около 270.

Вторым по численности является *реактор типа BWR* (boiled water reactor), их по состоянию на 2000 г. насчитывалось около 90.

*Реакторов типа PHWR* (pressurized heavy water reactor) насчитывалось 42, а *реакторов типа CGR* (carbon gas reactor) – 23.

В России в основном используются два основных типа энергетических реакторов:

- *реактор большой мощности канальный (РМБК);*
- *водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР).*

Основные различия между реакторами состоят в типе теплоносителя. В реакторах типа PWR, ВВЭР теплоносителем является обыкновенная (легкая) вода под давлением. Эта же вода является и замедлителем нейтронов. В реакторах типа BWR теплоносителем является кипящая вода, а поскольку паровоздушная смесь имеет меньшие замедляющие свойства, размеры реактора возрастают. Реакторы типа PHWR используют в качестве замедлителя тяжелую воду, а в качестве теплоносителя – обычную. Реакторы, использующие в качестве теп-

лоносителя и замедлителя обычную воду, отличительной чертой имеют прочный металлический корпус, в который заключается активная зона. Поэтому такие реакторы называют *корпусными*.

В настоящее время Белорусская АЭС строится по Проекту АЭС-2006 с повышенными характеристиками безопасности и технико-экономическими показателями и полностью соответствует международным нормам и рекомендациям МАГАТЭ. В проекте применяются инновационные энергоблоки поколения «3+» типа ВВЭР-1200, а также самые современные средства и системы безопасности:

- четыре канала систем безопасности (дублирующие друг друга);
- устройство локализации расплава;
- двойная защитная оболочка здания реактора;
- система удаления водорода;
- системы пассивного отвода тепла;
- защита станции от внешних воздействий (рисунок 2.26).

Высокая степень безопасности Белорусской АЭС обеспечена большим количеством факторов. Основные из них:

- принцип самозащищенности реакторной установки;
- наличие нескольких барьеров безопасности;
- многократное дублирование каналов безопасности.

В целях безопасности также применяются *активные* (то есть требующие вмешательства человека и наличия источника энергоснабжения) и *пассивные* (не требующие вмешательства оператора и источника энергии) *системы безопасности*.

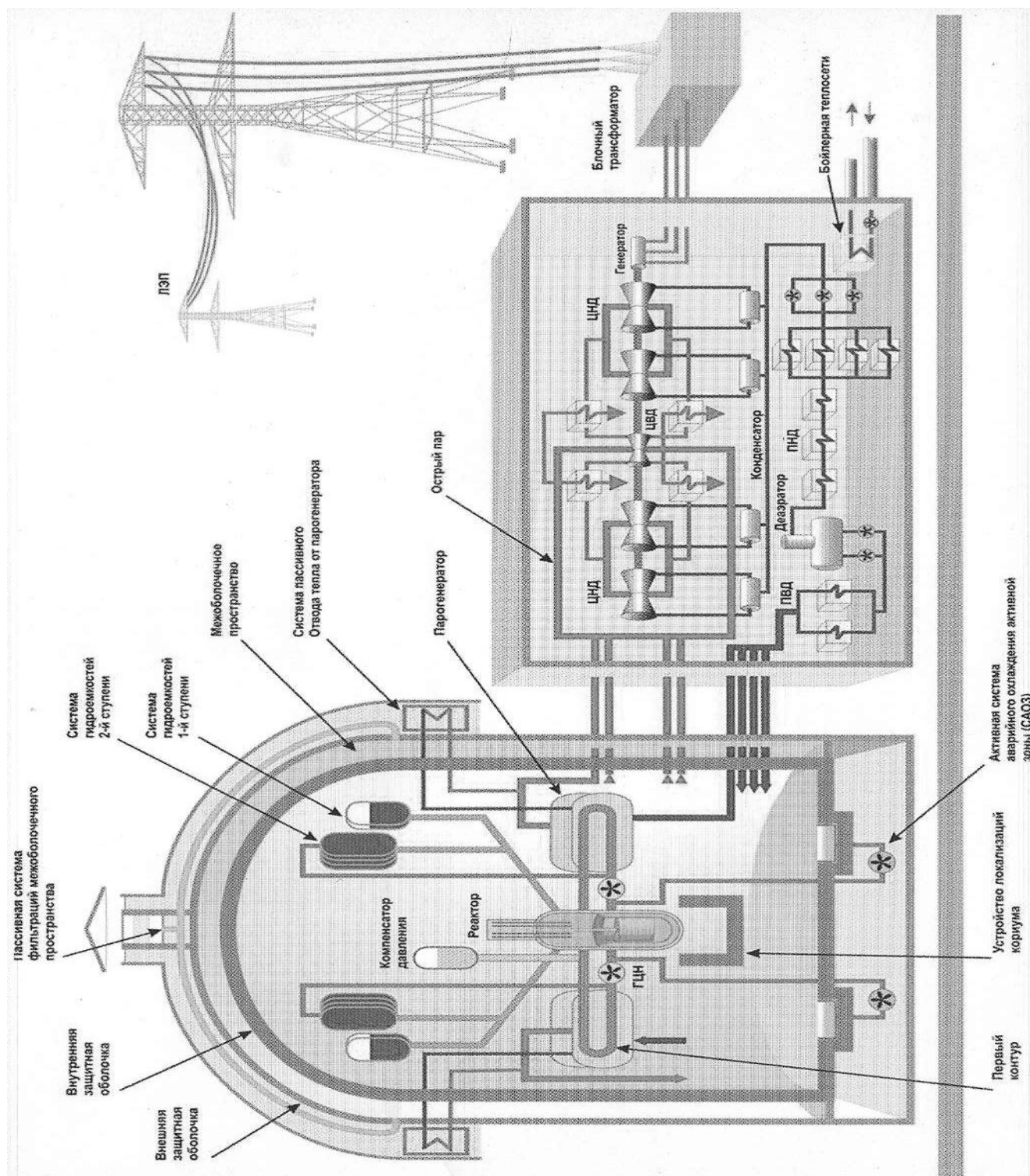
Система безопасности современных российских АЭС состоит из четырех барьеров на пути распространения ионизирующих излучений и радиоактивных веществ в окружающую среду.

Первый – топливная матрица, предотвращающая выход продуктов деления под оболочку тепловыделяющего элемента.

Второй – оболочка тепловыделяющего элемента, не дающая продуктам деления попасть в теплоноситель главного циркуляционного контура.

Третий – главный циркуляционный контур, препятствующий выходу продуктов деления под защитную герметичную оболочку.

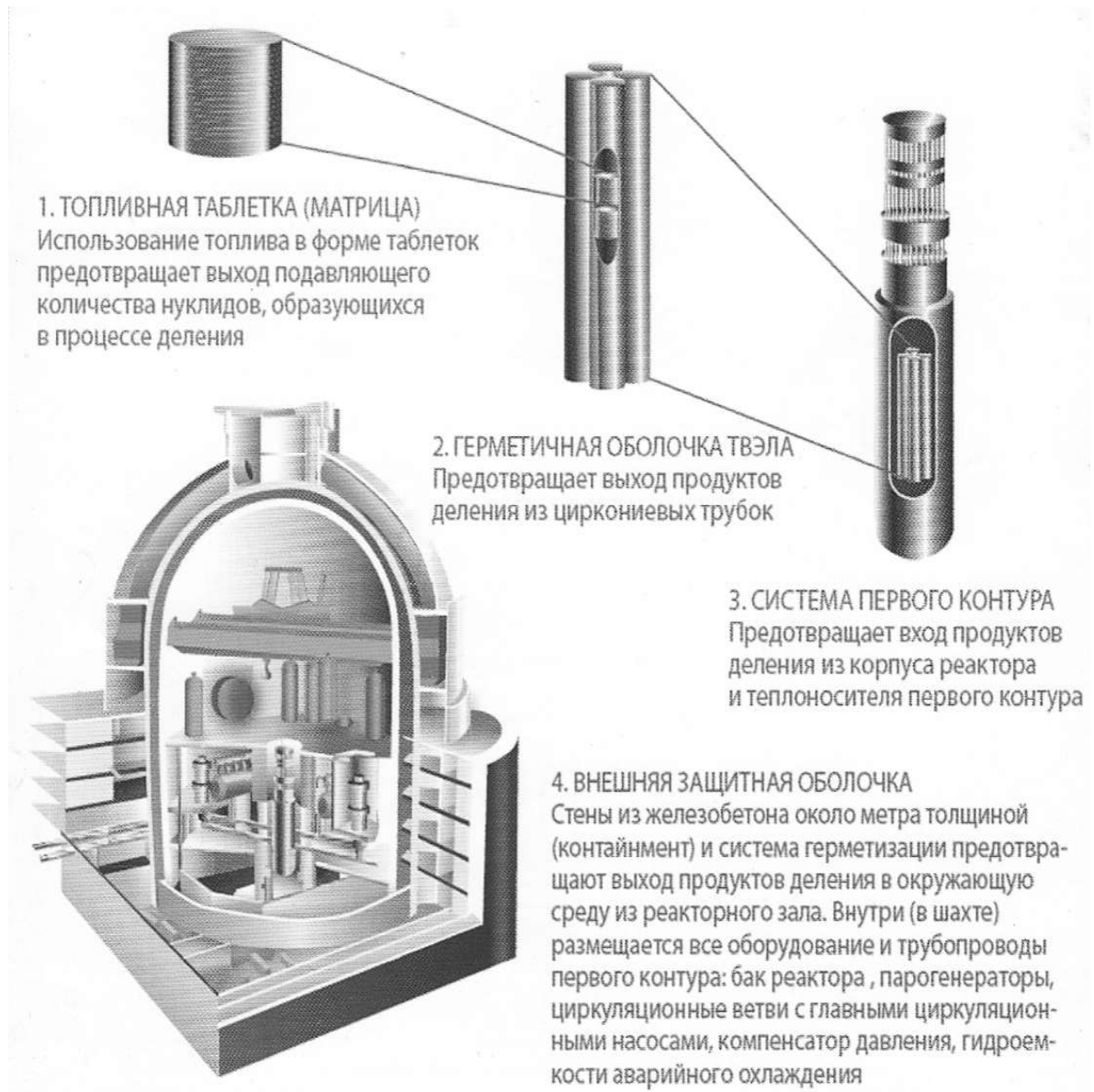
Четвертый – это система защитных герметичных оболочек (контайнмент), исключающая выход продуктов деления в окружающую среду (рисунок 2.27).



**Рисунок 2.26.** Система безопасности Белорусской АЭС

Герметичные оболочки контаймента изготовлены из «предварительно напряженного бетона», их устойчивость повышают металлические тросы, натянутые внутри бетона.



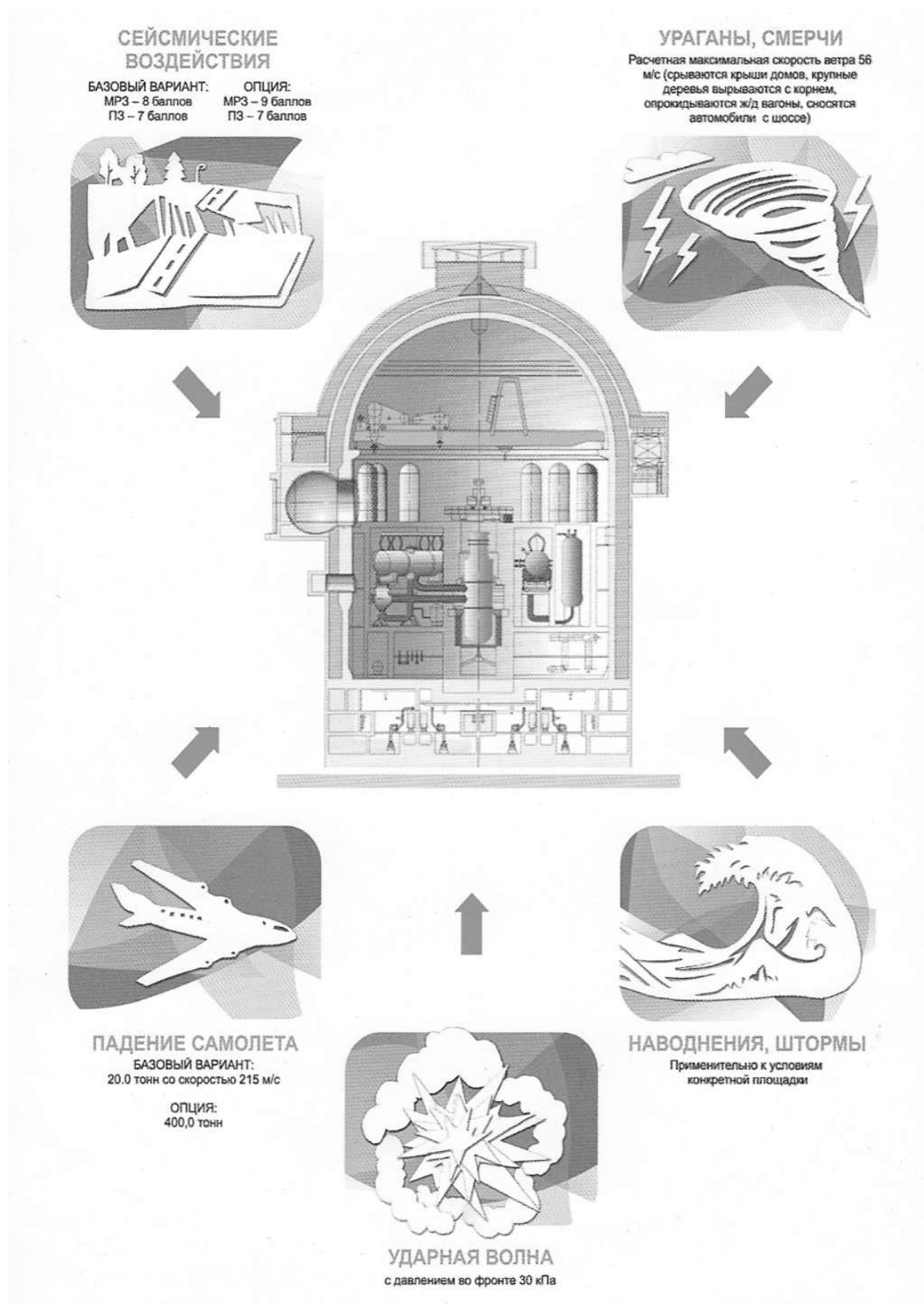


**Рисунок 2.27.** Защитные барьеры АЭС

Контейнмент выдерживает внутреннее давление в  $5 \text{ кг/см}^2$  и внешнее воздействие от ударной волны, создающей давление  $30 \text{ кПа}$ , и падающего самолета (рисунок 2.28). Объем контейнмента равен  $75 \text{ тыс. м}^3$ , риск скопления в нем водорода во взрывоопасной концентрации значительно меньше, чем на АЭС «Фукусима-1».

Внутри защитной оболочки оборудована «спринклерная система», разбрызгивающая раствор бора и других веществ, препятствующих распространению радиоактивности. Там же устанавливаются ре-

комбинаторы водорода, предотвращающие его накопление и исключающие возможность взрыва.



**Рисунок 2.28.** Защитные характеристики контейнмента АЭС

## **Авария на Чернобыльской АЭС как источник ионизирующего излучения**

Сегодня на планете действуют более 400 атомных электростанций, более 100 находятся на стадии строительства, многие ядерные реакторы функционируют на других объектах. Ядерные реакторы атомных электростанций являются наиболее важными объектами радиационной опасности, так как в них при выработке атомной энергии накапливаются радиоактивные вещества, образующиеся при распаде ядер атомов топлива.

К настоящему времени в мире зарегистрировано порядка 300 атомных аварий на АЭС, которые сопровождались выбросом в окружающую среду радиоактивных веществ.

**Радиационная авария** – это потеря управления источником ионизирующего излучения, обусловленная неисправностью оборудования, ошибочными действиями персонала, природными катастрофами либо другими причинами, которая подвергает людей облучению выше установленных норм или окружающую среду – радиоактивному загрязнению.

Одним из наиболее значимых источников ионизирующих излучений XX века явилась авария, произошедшая на Чернобыльской АЭС. По Международной шкале событий на атомных электростанциях эта авария относится к 7-му классу «Крупная авария», затрагивает несколько стран и считается глобальной.

Первая авария на Чернобыльской АЭС произошла во время экспериментального пуска 1-го энергоблока еще в 1982 г. При этом утечки радиоактивных веществ не произошло, пострадавших не было, последствия были ликвидированы в течение трех месяцев.

По состоянию на апрель 1986 г. на Чернобыльской АЭС функционировали четыре энергоблока с реакторами РБМК-1000 общей мощностью 4000 МВт.

26 апреля 1986 г. на 4-ом энергоблоке АЭС произошел взрыв и начался пожар, сопровождающийся выбросом в окружающую среду около 10 ЭБк радиоактивных веществ, содержащих летучие радиоактивные инертные газы, сотни осколочных продуктов деления, накопившихся в зоне реактора, изотопы наведённой радиоактивности за счет веществ, которые сбрасывали на реактор, частички ядерного топлива.

Выброс газоаэрозольной струи достигал 1,5 км, длился 10 суток, был неравномерным по количеству выбрасываемых радионуклидов при постоянно меняющемся направлении ветра и осадках.

В результате выброса газоаэрозольной струи в атмосферный воздух, перемещения воздушных слоев произошло формирование радиоактивного облака, вторичное загрязнение атмосферы отмечалось в результате ветровой эрозии почвы уже после седиментации радионуклидов на объекты окружающей среды.

Медленное осаждение мельчайших аэрозольных частиц обусловило их перенос на большие расстояния. Вымывание радиоактивных веществ из атмосферы осадками приводило к повторному загрязнению больших территорий.

Около 70 % радиоактивных веществ, выброшенных из разрушенного реактора в атмосферу, в результате сухого и влажного осаждения выпали на территорию Беларуси. При этом 46,5 тыс. км<sup>2</sup> территории Республики Беларусь с 3221 населенными пунктами, в том числе 27 городов, где проживало около 2,2 млн. взрослых и более 400000 детей, оказалось загрязненной цезием-137 выше 37 кБк/м<sup>2</sup>.

Радиоактивное загрязнение распространилось по всем областям республики и имело неравномерный «пятнистый» характер. Максимальное содержание в воздухе радионуклидов наблюдалось 27-28 апреля.

Максимальные уровни загрязнения были обнаружены в 30-километровой зоне вокруг Чернобыльской АЭС:

- по цезию-137 – 18500 кБк/м<sup>2</sup>;
- по стронцию-90 – более 455 кБк/м<sup>2</sup>;
- по плутонию-239, 240 – около 150 кБк/м<sup>2</sup>.

Участки с высокими уровнями загрязнения также были выявлены и за пределами зоны (д. Чудяны Могилевской области (5402 кБк/м<sup>2</sup>), западная часть д. Веприн Могилевской области (2035 кБк/м<sup>2</sup>), д. Колыбань Гомельской области (2424 кБк/м<sup>2</sup>).

Самыми пострадавшими от Чернобыльской катастрофы областями Беларуси являются Гомельская, Могилевская и Брестская. В Минской, Гродненской и 4-х населенных пунктах Витебской области содержание **цезия-137** в почве превышало 37 кБк/м<sup>2</sup>.

На остальной территории Беларуси уровни загрязнения почвы цезием-137 были выше доаварийных значений, за исключением северо-западных районов Витебской области.

Максимальные уровни **стронция-90** обнаруживались в пределах 30-км зоны ЧАЭС и достигали 1800 кБк/м<sup>2</sup> в Хойникском районе

Гомельской области. Содержание стронция-90 в почве выше 5,5 кБк/м<sup>2</sup> обнаружено на 10 % территории. Наиболее высокое его содержание обнаружено в почвах Чериковского района Могилевской области (29 кБк/м<sup>2</sup>) и Ветковского района Гомельской области (37 кБк/м<sup>2</sup>).

Содержание в почве **плутония-238, -239, -240** 3,7 кБк/м<sup>2</sup> было характерно для 30-км зоны ЧАЭС. Самые высокие уровни наблюдались в Хойникском районе Гомельской области – более 111 кБк/м<sup>2</sup>. Загрязнение почвы изотопами более 0,37 кБк/м<sup>2</sup> охватывало около 2 % площади республики в основном в Гомельской области.

Вследствие аварии на ЧАЭС источником ионизирующих излучений явилось 23 % загрязненной территории Республики Беларусь (таблица 2.12).

**Таблица 2.12** – Важнейшие радионуклиды, выброшенные в окружающую среду в результате катастрофы на ЧАЭС

Радионуклид	Процент выброшенной активности на 5.05.1986 г.	Распространилось в окружающую среду Бк × 10 <sup>16</sup>	Период полураспада
Криптон-85	100	3,3	10,72 часа
Ксенон-133	100	170,0	5,25 дня
Йод-131	50	65,0	8,05 дня
Цезий-134	25	4,7	2,06 года
Цезий-137	30	8,7	30,0 лет
Стронций-89	10	20,0	50,5 дня
Стронций-90	10	2,0	29,12 лет
Цирконий-95	8	35,0	64,0 дня
Рутений-103	8	33,0	39,3 дня
Рутений-106	8	17,0	368,0 дней
Церий-141	6	26,5	32,5 дня
Церий-144	8	25,6	284 дня
Плутоний-238	8	0,008	87,74 года
Плутоний-239	8	0,006	24390 лет
Плутоний-240	8	0,008	6537 лет
Плутоний-241	8	1,4	14,4 года

В июле 1990 г. Верховный Совет республики объявил Беларусь зоной национального радиационного экологического бедствия. Это означает, что последствия глобальной ядерной аварии, приведшей к

неблагоприятным изменениям экологической обстановки и условий обитания человека, создают возможность острых или хронических поражений людей, животных, растений, а также приносят материальный ущерб, превышающий годовой национальный доход республики.

Радионуклиды, попадающие в результате выброса на почву, осуществляют *вертикальную и горизонтальную миграцию, загрязняют поверхностные и подземные воды, воздух, флору и фауну* и тем самым увеличивают количество источников ионизирующих излучений и их объем и площади.

*Вертикальная миграция* радионуклидов происходит за счет:

- переноса с атмосферными осадками вглубь почвы;
- капиллярных явлений;
- диффузии;
- переноса по корневым системам растений;
- деятельности почвенных животных;
- хозяйственной деятельности человека.

*Горизонтальная миграция* осуществляется с:

- ветром;
- пожарами;
- стоками поверхностных вод;
- паводковыми и дождевыми потоками;
- хозяйственной деятельностью человека.

Средняя скорость миграции цезия-137 и стронция-90 вглубь составляет 0,3-0,5 см/год, максимальная глубина миграции отмечается в торфяно-болотных почвах на глубину 35 см и больше. На необрабатываемых землях основное количество радионуклидов содержится в верхнем 5-сантиметровом слое, в почвах сельскохозяйственного использования – в пахотном горизонте. По причине вертикальной миграции радионуклидов самоочищение почв происходит медленно.

Радионуклиды, находящиеся в почве в водорастворимой, обменной или подвижной формах, способны переходить в растения.

Накопление сельскохозяйственными культурами радионуклидов зависит от:

- плодородия почвы;
- влажности почвы;
- типа почвы;
- биологических особенностей культивируемых растений.

Наименее значителен переход радионуклидов в растения на суглини-

стых, не переувлажненных плодородных почвах с высоким содержанием гумуса и калия.

В легких почвах республики радионуклиды цезия-137 и стронция-90 плохо связываются почвой, более подвижны, и поэтому легче переходят в растения. Более высокие уровни накопления радионуклидов в продуктах питания соответствуют Полесскому региону благодаря песчаным, подзолистым, торфяно-болотным легким почвам с невысоким содержанием гумуса.

В послеаварийном периоде было отмечено постепенное снижение мощности дозы  $\gamma$ -излучения, которое происходило за счет *естественного распада радионуклидов и миграции радионуклидов вглубь почвы*.

В 2005 г. максимальные уровни мощности экспозиционной дозы, превышающие естественный фон в 1,5-4 раза зарегистрированы в Хойниках (29 мкР/ч), Чечерске (30 мкР/ч), Наровле (70 мкР/ч), Брагине (82 мкР/ч). В областных центрах среднегодовой уровень находился в пределах 10-15 мкР/ч.

Мониторинг природных популяций растений показал, что растительные экосистемы устойчивы к радиационному воздействию. Только при очень высоких плотностях загрязнения (свыше 3,7 МБк/м<sup>2</sup>), в непосредственной близости от разрушенного реактора у растений наблюдаются искривления и опухолевые утолщения стеблей, асимметрия и курчавость листьев, усиление роста боковых побегов, карликовость, кустистость, гигантизм, порывание, а также хромосомные аберрации в клетках, являющиеся результатами воздействия радиации.

Кумуляция радионуклидов в организме диких животных обусловлена радиоактивным загрязнением территории их обитания. Самое высокое содержание радионуклидов у представителей фауны наблюдалось в первые годы после аварии в 30-километровой зоне. К концу 1980-х гг. их содержание уменьшилось в 5-10 раз. В настоящее время наблюдается тенденция к стабилизации содержания радионуклидов в организме животных. Содержание цезия-137 в мясе диких животных на загрязненных территориях составляет 2-250 кБк/кг.

В целом обитание животных в загрязненных радионуклидами биогеоценозах не привело к заметным радиационным эффектам на популяционном уровне.

Прекращение хозяйственной деятельности на загрязненных радионуклидами территориях обусловило сначала существенное увели-

чение, а затем – стабилизацию численности популяций птиц и охотничье-промысловых млекопитающих в 30-километровой зоне.

Значительное количество пищи и отсутствие охоты способствовало увеличению численности волка в 4-5 раз. На территориях отселенных пунктов из-за перераспределения в структуре популяций более мелких млекопитающих в настоящее время встречаются и лесные виды, и виды открытых пространств. Произошло возобновление некоторых редких видов животных.

Возросли в 3-3,5 раза численность и разнообразие видов насекомых по сравнению с теми же показателями на приусадебных участках соседних неотселенных деревень.

В районах мелиоративных систем увеличились численность и количество видов амфибий, рептилий и птиц болотной и древесно-кустарниковой экосистем.

Разнообразие и количество паразитов диких птиц, мелких млекопитающих, а также кровососущих насекомых в районах, загрязненных радионуклидами, повысились по сравнению с аналогичными показателями соседних территорий. В будущем, в зонах отчуждения и отселения прогнозируется дальнейший рост численности видов, которые имеют эпидемическое и эпизоотическое значение, что создаст возможность инфекций и инвазий, а также благоприятных условий для постоянной и последовательной передачи возбудителей туляремии, клещевого энцефалита, кокцидиомикоза от одного организма к другому.

Также в перспективе возможно накопление генетического груза, что приведет к изменению популяций флоры и фауны на загрязненных территориях.

При воздействии радионуклидов чернобыльского выброса на человека различают:

- *облучение короткоживущими радионуклидами;*
- *внешнее гамма-облучение от радиоактивного облака;*
- *ингаляционное поступление радионуклидов;*
- *внешнее гамма-излучение от осевших на земную поверхность и объекты окружающей среды радионуклидов;*
- *внешнее контактное гамма- и бета-облучение;*
- *поступление радионуклидов в организм по пищевым цепочкам;*
- *облучение инкорпорированным йодом-131.*

Сразу после аварии радиационная обстановка в Республике Беларусь и формирование дозовых нагрузок на население определялись действием молибдена, технеция, лантана, бария, благородных инерт-



ных газов, радиоизотопов йода-131, йода-132, йода-133, йода-134, йода-135, йода-123, йода-125, йода-126 и других *короткоживущих радионуклидов*.

Уровни радиоактивного загрязнения короткоживущими радионуклидами йода во многих регионах республики были настолько велики, что вызванное ими облучение миллионов людей квалифицировалось специалистами как период «йодного удара». В апреле – мае 1986 г. наибольшие уровни выпадения йода-131 имели место в 30-км зоне в Брагинском, Хойникском, Наровлянском районах Гомельской области ( $37000 \text{ кБк/м}^2$ ), в Чечерском, Кормянском, Буда-Кошелевском, Добрушском районах уровни загрязнения достигали  $18500 \text{ кБк/м}^2$ . В Могилевской области наибольшее загрязнение отмечалось в Чериковском и Краснопольском районах –  $5550\text{-}11100 \text{ кБк/м}^2$ .

*Внешнее гамма-облучение от радиоактивного облака* продолжалось короткое время до образования радиоактивного следа на местности и внесло 2,5 % в дозовую нагрузку в первый послеаварийный год составил.

*Ингаляционное поступление радионуклидов в организм человека* сформировало 4,5 % дозы за счёт внутреннего облучения организма из радиоактивного облака за короткий период и за счёт вторичного загрязнения атмосферы ветровым подъёмом пыли в течение длительного времени у населения на загрязнённых территориях.

*Внешнее гамма-излучение от вымытых из атмосферы и осевших на местность радионуклидов* было самым длительным и интенсивным. Осевшие на землю и объекты окружающей среды в основном долгоживущие  $\gamma$ -излучающие радиоактивные вещества сформировали около 50-60 % дозы у населения.

*Внешнее контактное гамма- и бета-облучение* вследствие загрязнения кожи и одежды радионуклидами обусловило у население дозу на коже порядка 150-200 мЗв.

*Поступление радионуклидов в организм по пищевым цепочкам* на легких почвах в Беларуси имеет особое значение, поскольку здесь цезий-137 и стронций-90 быстро переходят в растения и определяют высокую радиоактивность местных пищевых продуктов. Продукты питания формируют основную дозовую нагрузку на организм, составляющую более 80 %.

*Облучение инкорпорированным йодом-131* имеет важное клиническое значение вследствие повреждения щитовидной железы.

Следует подчеркнуть, что из всех радионуклидов и путей облучения особое влияние на облучение населения оказало внутреннее ингаляционное и пероральное облучение от короткоживущих радионуклидов (прежде всего йода-131), а также внешнее облучение от долгоживущих радионуклидов, выпавших на поверхность почвы.

Последствием аварии на Чернобыльской АЭС у жителей Беларуси в результате облучения радиоактивным йодом-131 явилось резкое увеличение количества заболеваний щитовидной железы (гиперплазия, узловой зоб, рак), также значительно вырос уровень мутаций, хромосомных нарушений, увеличилось количество рождения детей с врожденными и наследственными пороками развития.

Наиболее значимым медицинским последствием аварии является рак щитовидной железы. В Беларуси, России, Украине у лиц, облученных в возрасте 0-18 лет, за последние 20 лет были выявлены около 5000 случаев рака щитовидной железы.

Структура общесоматической заболеваемости в республике после аварии на ЧАЭС претерпела изменения за счет роста уровня заболеваемости нервной, эндокринной и иммунной систем, а также систем кровообращения, дыхания, пищеварения.

У пострадавших произошли изменения **неврологического и психоэмоционального статуса** (снижение психической адаптации, низкая самооценка, снижение работоспособности).

Из заболеваний **эндокринной системы** у детей, проживающих на загрязненных радиоактивными веществами территориях, чаще встречается узловая патология щитовидной железы и аутоиммунные тиреоидиты.

**Нарушения иммунной системы** проявляются в виде низкой резистентности к патогенным микроорганизмам, иммунодефицитов, а также аутоиммунных заболеваний.

У взрослого эвакуированного населения выросла заболеваемость **системы кровообращения**.

У детского населения, эвакуированного или проживающего на загрязненных территориях отмечается увеличение патологии **органов дыхания**.

У эвакуированных из 30 км зоны детей на втором месте располагаются болезни **пищеварительной системы**, включая заболевания желудка, двенадцатиперстной кишки, желчевыводящих путей.

После аварии на ЧАЭС у 134 человек, принимавших участие в ликвидации последствий и облученных дозами 1-16 Гр, диагностировалась острая лучевая болезнь. Из них в период 3 месяца после аварии

умерли 28 пациентов. При этом средняя поглощенная доза облучения составила в 1986 г. – 160-185 мГр, 1987 г. – 90-130 мГр, 1988 г. – 30-50 мГр.

В развитии общесоматических заболеваний большую роль сыграли длительное проживание в условиях повышенного радиационного фона, частые выезды на дезактивационные работы, осознание угрозы для здоровья и жизни, радиофобия.

У ликвидаторов при дозах более 5 сГр спустя четыре года отмечался рост числа заболеваний нервной системы, крови и кроветворных органов, органов пищеварения. Облучение дозами от 5-15 сГр до 25-50 сГр привело к функциональным психофизиологическим и психологическим изменениям. Доза внешнего облучения выше 25-50 сГр обусловила стойкие и выраженные нарушения вегетативной регуляции.

Среди нервно-психических расстройств отмечались *астенический, психовегетативный, неврозоподобный, депрессивный и психорганический* синдромы. У 30 % обследованных пациентов психофизиологические расстройства перешли в стойкие психосоматические. Дозовые нагрузки от 60 до 100-200 сГр вызвали дизрегуляторный синдром, модифицирующий клиническое течение ранее существовавшей патологии, способствующий более стремительному ее течению и снижающий эффективность терапии.

Около 50 % заболеваемости системы кровообращения у ликвидаторов составляет *гипертоническая болезнь*, имеющая особенности (небольшая эффективность лечения, сочетание с церебральными и вегетативными расстройствами). Также у ликвидаторов в отдаленные сроки после аварии часто встречается *ишемическая болезнь сердца* с атипичным течением (полиморфизмом жалоб, нарушениями сердечного ритма, необычным характером кардиалгии, сочетанием с гипертензией, вегетососудистой дистонией).

Патология дыхательной системы у ликвидаторов проявляется *хронической неспецифической патологией легких* (гнойный, катарально-склеротический, атрофический, обструктивный бронхиты).

Наиболее частой патологией ЖКТ являются *хронические гастрит, эрозивный и атрофический гастродуодениты*, а также *язвенная болезнь, эзофагит, панкреатит, дискинезии желчевыводящих путей, дисбактериоз кишечника*. В их течении отмечают замедление процессов регенерации, прогрессирующе-рецидивирующий характер, торпидное течение рецидивов, более короткие ремиссии, выраженность болевого синдрома. Среди болезней эндокринной систе-

мы у ликвидаторов спустя 5-7 лет после аварии выделяют **узловые формы зоба, аутоиммунный тиреоидит, рак щитовидной железы** и другие. Нарушения функции органа зрения у 50-80% ликвидаторов чаще всего проявляются **катарактами, деструкцией стекловидного тела, ангиопатиями, ангиосклерозом, макулодистрофиями, периферической витреохориоретинальной дистрофией**, приводящими к снижению зрения. У лиц, участвующих в работах на ЧАЭС спустя 4-5 лет выявлялась Т- и В-клеточная недостаточность, индуцировались аутоиммунные процессы. При этом **ухудшалась резистентность организма**, возникали **аутоиммунные болезни**.

### Радиационный фон Земли

Ионизирующее излучение природных источников, а также искусственных радионуклидов, рассеянных в биосфере в результате деятельности человека, формируют **радиационный фон** Земли. Он воздействует на все население земного шара и участвует в формировании эффективных доз облучения человека как за счет внешнего, так и за счет внутреннего облучения. Радиационный фон включает естественный радиационный фон (ЕРФ) и техногенно измененный радиационный фон (ТИРФ).

Под **естественным радиационным фоном** понимают ионизирующее излучение от природных источников, действующее на человека на поверхности Земли, **техногенно измененный радиационный фон** – это ионизирующее излучение источников и радионуклидов, созданных или рассеянных в биосфере в результате деятельности человека. Основными составляющими естественного радиационного фона являются *природные источники внеземного (космического) и земного происхождения*, техногенно измененного радиационного фона – *техногенно измененный естественный радиационный фон (ТИ-ЕРФ)* и *искусственный радиационный фон (ИРФ)*.

**Техногенно измененный естественный радиационный фон** представляет собой ионизирующее излучение от природных источников, изменившихся в результате деятельности человека:

- извлечение из недр полезных ископаемых (главным образом минеральных удобрений), содержащих радионуклиды;
- поступление в среду продуктов сгорания органического топлива;
- использование стройматериалов с высоким содержанием радионуклидов;

- широкое использование авиации, что повышает воздействие на человека внеземных источников ионизирующего излучения;
- использование бытовых предметов, содержащих естественные радионуклиды.

**Искусственный радиационный фон** обусловлен искусственно созданными источниками ионизирующего излучения, включая искусственные радионуклиды. К ним можно отнести:

- применение источников ионизирующего излучения в научных, хозяйственных и медицинских целях (для диагностики и лечения);
- выпадения радионуклидов при испытаниях ядерного оружия и при работе ядерно-топливных предприятий и установок;
- телевидение, мониторы компьютеров и другие приборы, являющиеся источниками электромагнитных излучений.

Индивидуальные дозы, получаемые людьми от искусственных источников, очень переменчивы. Вклад различных источников радиационного фона в формирование годовых эффективных доз (ГЭД) облучения населения отображает таблица 2.13.

**Таблица 2.13** – Источники радиационного фона и ГЭД облучения

Источник радиационного фона	Годовая эффективная доза, мЗв		
	внешнее облучение	внутреннее облучение	сумма
<i>Естественный радиационный фон:</i>			
Внеземное излучение	0,3	0,015	0,315
Земное излучение	0,35	2,326	2,676
В том числе: семейство U-238	0,09	0,95	1,04
Семейство Th-232	0,14	0,19	0,33
Ингаляция Rn-222		1,0	1,0
K-40	0,12	0,18	0,30
Rb-87		0,006	0,006
ВСЕГО источники ЕРФ	0,65	2,341	2,991
<i>Техногенно измененный радиационный фон:</i>			
Медицинские манипуляции			0,4
Строительные материалы			0,1
Испытания ядерного оружия и предприятия			0,02
Телевидение			0,01
Полеты на самолетах			0,05
ВСЕГО источники ТИРФ			0,6
ВСЕГО			3,6

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Ионизирующие излучения, их свойства.
2. Дозы ионизирующих излучений.
3. Дозиметрия и радиометрия.
4. Источники ионизирующих излучений.
5. Авария на ЧАЭС как источник ионизирующего излучения
6. Радиационный фон Земли, его составляющие.

## ГЛАВА 4

### РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ. ПРОФИЛАКТИКА ЛУЧЕВЫХ ПОРАЖЕНИЙ

#### Правовое регулирование и обеспечение радиационной безопасности

*Радиационная безопасность* населения – это состояние защищенности настоящего и будущих поколений людей от вредного воздействия ионизирующих излучений.

Правовое регулирование в сфере обеспечения радиационной безопасности в Беларуси базируется на Конституции Республики Беларусь и реализуется следующими законами:

- Закон Республики Беларусь № 122-З «О радиационной безопасности населения» от 5 января 1998 г.;
- Закон Республики Беларусь № 426-З «Об использовании атомной энергии» от 30 июля 2008 г.;
- Закон Республики Беларусь № 340-З «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» от 7 января 2012 г.

Также радиационная безопасность координируется актами Президента Республики Беларусь и прочими нормативными правовыми актами, включая технические:

– «Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в пищевых продуктах и питьевой воде (РДУ-99)», утвержденные Постановлением Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь 26.04.1999 г. № 16;

– Санитарные нормы, правила и гигиенические нормативы «Гигиенические требования к проектированию и эксплуатации атомных электростанций», утвержденные Постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь 31.03.2010 г. № 39;

– Санитарные нормы и правила «Требования к радиационной безопасности» и Гигиенический норматив «Критерии оценки радиационного воздействия», утвержденные Постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь 28.12.2012 № 213;

– Санитарные нормы и правила «Требования к обеспечению радиационной безопасности персонала и населения при осуществлении деятельности по использованию атомной энергии и источников ионизирующего излучения», утвержденные Постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь 31.12.2013 № 137;

– Санитарные нормы и правила «Требования к обеспечению радиационной безопасности персонала и населения при обращении с радиоактивными отходами», утвержденные постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь 31.12.2015 №142.

Основополагающим в области обеспечения радиационной безопасности населения является Закон Республики Беларусь «О радиационной безопасности населения» с изменениями и дополнениями, который обуславливает формирование условий для охраны жизни и здоровья людей от вредного влияния ионизирующей радиации.

В данном Законе обозначены *категории облучаемых лиц* и главные *принципы* обеспечения радиационной безопасности. Под **категориями облучаемых** лиц понимают условно выделяемые облучаемые группы людей, отличные по степени контакта с ионизирующим излучением, включающие **население и персонал**. Главные *принципы* обеспечения радиационной безопасности:

- нормирования;
- обоснования;
- оптимизации.

В соответствии с **принципом нормирования** не допускается превышение пределов индивидуальных доз облучения от всех источников ионизирующего излучения. Согласно Закону «О радиационной безопасности населения» основными пределами доз облучения от источников ионизирующего излучения (кроме доз от естественного радиационного фона, техногенно измененного радиационного фона и медицинского облучения) являются:

- для населения средняя годовая эффективная доза – 0,001 Зв или эффективная доза за период жизни (70 лет) – 0,07 Зв;
- для персонала средняя годовая эффективная доза – 0,02 Зв или эффективная доза за время трудовой деятельности 50 лет – 1 Зв.

Согласно **принципу обоснования** не разрешается любая деятельность по применению источников ионизирующей радиации, при которой вред от полученного облучения превышает возможную пользу для человека и населения в целом.

**Принцип оптимизации** отражает необходимость при использовании источника ионизирующего излучения поддерживать пределы индивидуальных доз и количество облучаемых на достижимо малом уровне (с учетом экономических и социальных факторов).

Следует отметить возможность корректировки принципов в зависимости от ситуаций облучения.



Государственное управление в сфере обеспечения радиационной безопасности страны осуществляют:

- ✓ Президент Республики Беларусь;
- ✓ Совет Министров Республики Беларусь;
- ✓ Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь;
- ✓ Министерство здравоохранения Республики Беларусь;
- ✓ Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь;
- ✓ местные исполнительные и распорядительные органы;
- ✓ иные государственные органы и организации.

В частности, Министерство здравоохранения Республики Беларусь:

- ✓ реализует меры по выполнению единой государственной политики;
- ✓ осуществляет государственное санитарно-эпидемиологическое нормирование, в том числе, утверждение санитарных норм и правил, гигиенических нормативов;
- ✓ обеспечивает государственный санитарный надзор за соблюдением законодательства в области санитарно-эпидемиологического благополучия населения;
- ✓ формирует и обеспечивает функционирование единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения населения.

В соответствии с Законом «О радиационной безопасности населения», граждане Республики Беларусь и другие граждане, проживающие на ее территории, имеют право на радиационную безопасность. Это право гарантируется мерами по предотвращению облучения сверх установленных пределов доз, а также выполнению гражданами и персоналом, работающим с источниками ионизирующей радиации, требований по обеспечению радиационной безопасности. При этом пользователи источников ионизирующего излучения обязаны также осуществлять мероприятия по обеспечению радиационной безопасности, а граждане Республики Беларусь и лица, пребывающие на ее территории – непосредственно участвовать в реализации данных мероприятий. Граждане, невыполняющие или нарушающие требования радиационной безопасности, несут ответственность согласно законодательству Республики Беларусь.

Также лица, проживающие и пребывающие на территории республики, имеют право на своевременную полную и достоверную ин-

формацию о радиационной опасности и принимаемых мерах по ее предотвращению, а население загрязненных радионуклидами территорий – на социальную защиту, возмещение причиненных вреда здоровью и убытков имуществу.

**Радиационная безопасность населения** обеспечивается:

- созданием благоприятных условий жизнедеятельности людей;
- установлением квот на облучение от разных источников ионизирующего излучения;
- организацией радиационного контроля;
- эффективностью планирования и проведения мероприятий по радиационной защите в планируемых, аварийных и существующих ситуациях;
- организацией системы информирования о радиационной обстановке.

В связи с указанным в республике осуществляются:

- комплекс правовых, организационных, инженерно- и агротехнических, санитарно-гигиенических, медико-профилактических и иных мер;
- мероприятия по выполнению требований радиационной безопасности республиканскими органами государственного управления, местными исполнительными и распорядительными органами, другими организациями и гражданами;
- информирование населения о радиационной обстановке и мерах по обеспечению радиационной безопасности;
- обучение и воспитание населения в сфере обеспечения радиационной безопасности.

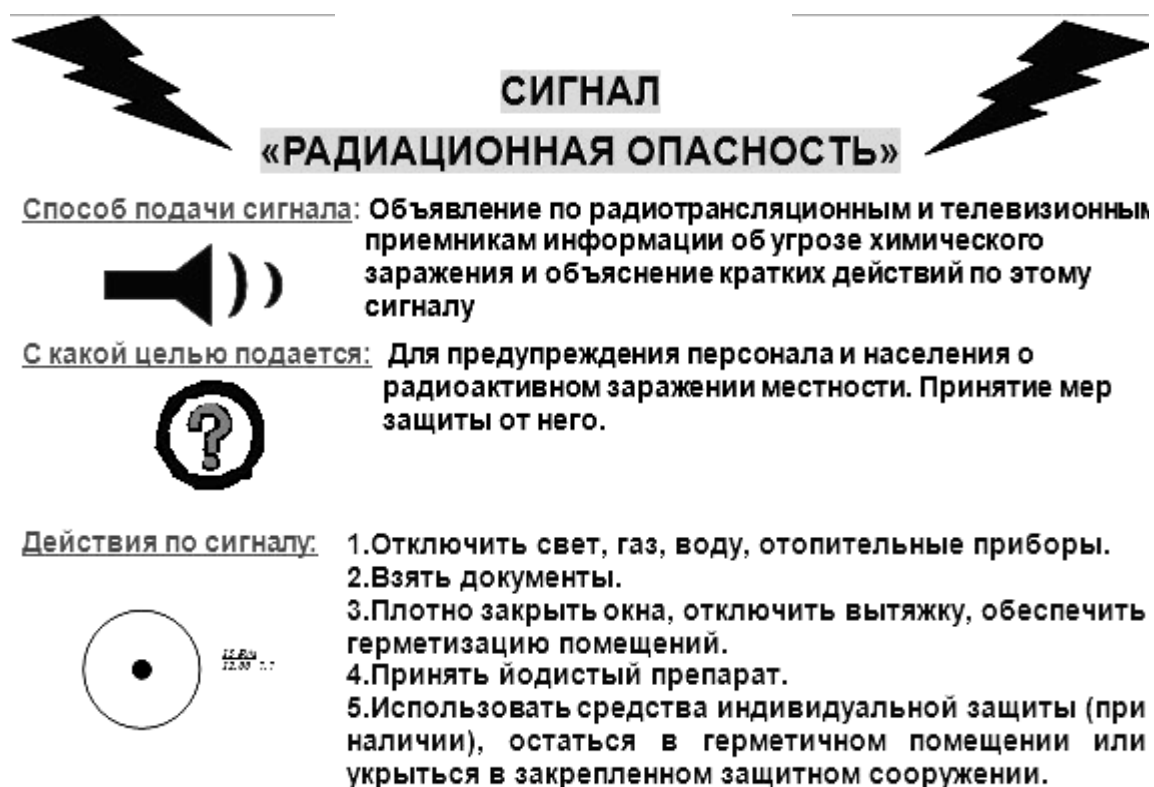
Следует отметить, что **медико-профилактические мероприятия** осуществляются специалистами организаций здравоохранения, включающих больничные, амбулаторно-поликлинические, аптечные, санитарно-эпидемиологические и другие организации. Врачи больниц и поликлиник проводят медицинскую профилактику и лечение лучевых поражений, дают рекомендации по индивидуальной профилактике, провизоры аптек обеспечивают население противолучевыми лекарственными средствами, врачи центров гигиены и эпидемиологии участвуют в проведении санитарно-гигиенических и санитарно-противоэпидемических мероприятий.

Население **информируется** о радиационной обстановке и мерах по обеспечению радиационной безопасности согласно статье 21 «Право граждан и общественных объединений на получение инфор-

мации» Закона Республики Беларусь «О радиационной безопасности населения». Сведения о радиационной обстановке предоставляются гидрометеоцентрами в сводках о предстоящей погоде, а также другими компетентными службами.

*В условиях аварийного облучения* оповещение населения осуществляется с помощью телевидения, радиовещания, рассылки СМС-сообщений, применения специальной аппаратуры и средств подачи звуковых и световых сигналов. В данном случае население немедленно уведомляется о порядке действий, примерном времени начала выпадения радиоактивных осадков, времени приближения радиоактивного облака, а также виде отравляющих веществ. В населенных пунктах оборудуются разнообразные сигнальные аппаратура и средства связи.

Населенные пункты и районы, к которым движется радиоактивное облако, образовавшееся при ядерном взрыве, оповещаются сигналом «Радиационная опасность» (рисунок 4.1). После данного сигнала необходимо срочно надеть противогаз, а при его отсутствии – респиратор либо ватно-марлевую повязку. Затем взять подготовленный заблаговременно запас продуктов питания, средства индивидуальной защиты, предметы первой необходимости и укрыться в противорадиационном убежище.



### Рисунок 4.1. Сигнал «Радиационная опасность»

До сведения подвергшихся радиационному облучению лиц обязательно должна доводиться информация о долгосрочных рисках для здоровья. Также в случае проведения эффективных защитных мероприятий, население должно быть проинформировано о том, что радиационно-обусловленные эффекты для здоровья не предвидятся.

**Обучение и воспитание населения** включает комплексную просветительную, обучающую и собственно воспитательную деятельность, направленную на обеспечение радиационной безопасности. В пределах своей компетенции в устной форме ее проводят работники местных исполнительных и распорядительных органов, руководящие работники предприятий, организаций и учреждений, педагоги, лекторы РГОО «Белорусское общество «Знание», а также медицинские и фармацевтические работники. Большое значение в обучении и воспитании населения принадлежит средствам массовой информации, в частности телевидению, радио, газетам, журналам, интернет-ресурсам.

Мероприятия по радиационной безопасности реализуются приемлемыми для общества средствами и предназначены для **снижения радиоактивного загрязнения среды обитания и облучения населения до наиболее низких уровней**. В целях снижения радиоактивного загрязнения среды обитания проводится комплекс законодательных, технологических, санитарно-технических, планировочных и организационных мероприятий.

**Законодательные** мероприятия направлены на разработку и совершенствование законов, подзаконных актов, статей в законы о радиационной безопасности, санитарно-эпидемическом благополучии населения, охране окружающей среды от загрязнения, а также норм и нормативов для радиационного фактора.

**Технологические** мероприятия позволяют резко ограничить радиоактивное загрязнение среды за счет создания и применения замкнутых и безотходных производственных процессов на предприятиях ядерной энергетики, а также в организациях и учреждениях, использующих источники ионизирующих излучений и радионуклиды.

**Санитарно-технические** мероприятия предусматривают очистку радиоактивных выбросов в атмосферу, сбросов в водоемы и отбросов на почву.

**Планировочные** мероприятия включают зонирование территории населенных мест, их озеленение, создание санитарно-защитных зон источников ионизирующей радиации.

**Организационные** мероприятия заключаются в осуществлении выбросов и сбросов загрязнителей в разное время суток, ограничении времени выбросов и сбросов загрязнителей, сменной работе технологического оборудования.

Для снижения облучения населения проводится **радиационная защита**, под которой подразумевается комплекс мероприятий правового, организационного, инженерного, агротехнического, санитарно-гигиенического и медико-профилактического плана, направленных на снижение интенсивности ионизирующего излучения. Различают *физическую, химическую и биологическую защиту* человека от радиации.

**Физическая защита** человека от радиации включает методы «защиты временем» (нахождение под облучением в течение минимально возможного времени), «защиты количеством» (получение минимально возможной дозы ионизирующего излучения), «защиты расстоянием» (нахождение от источника на максимально возможном расстоянии), и «защиты экранами» (наличие между источником излучения и облучаемым человеком преграды из материалов, поглощающих ионизирующие излучения). Она базируется на законах распространения ионизирующих излучений и характере их взаимодействия с веществом, согласно которым доза облучения прямо пропорциональна интенсивности излучения и времени воздействия и обратно пропорциональна толщине экрана и квадрату расстояния.

Физическая радиационная защита осуществляется **путем**:

- дезактивации территории, зданий, помещений, одежды, продуктов питания, воздуха, воды, почвы;
- использования индивидуальных средств защиты органов дыхания, кожи, частей тела;
- вентиляции помещений;
- санитарных обработок населения, помещений;
- применения минимального количества радиоактивных веществ в приборах и установках;
- использования стройматериалов с минимальным количеством радионуклидов;
- сокращения времени работ и пребывания человека возле источника излучения;
- применения постоянных и передвижных экранов между человеком и источником излучения;
- увеличения расстояния от источника, применения дистанционного управления, робототехники;

– снижения или ограничения потребления воздуха, воды, пищи и пищевых продуктов, загрязненных радионуклидами.

**Химическая радиационная** защита предполагает использование радиопротекторов, радиомитигаторов, химических лекарственных средств, снижающих всасывание и ускоряющих выведение радионуклидов, попавших в организм пероральным, ингаляционным или перкутаным путями, а также синтетических витаминов, микроэлементов, антиоксидантов.

Для **биологической** защиты используются радиопротекторы растительного и животного происхождения, растительная и животная пища, обладающая радиопротекторными свойствами, витамины и минералы, содержащиеся в продуктах питания.

Наряду с планированием и проведением мероприятий по обеспечению радиационной безопасности осуществляется **анализ и оценка**. С целью оценки состояния радиационной безопасности:

– характеризуют радиоактивное загрязнение окружающей среды;

– анализируют результативность мер по соблюдению нормативных правовых актов в сфере обеспечения радиационной безопасности, уровню готовности к эффективному устранению радиационных аварий и их последствий, доз облучения отдельных групп населения и количества облученных лиц;

– определяют вероятность и предполагаемый масштаб радиационных катастроф;

– вычисляют радиационный риск.

Радиационная безопасность регламентируется в ситуациях *планируемого, аварийного и существующего* облучения.

**Ситуация планируемого облучения** возникает при эксплуатации источника либо деятельности, приводящей к облучению от источника, рассчитанной заранее.

**Ситуация аварийного облучения** является результатом аварии, злоумышленного действия или иных непредвиденных обстоятельств и требует немедленного вмешательства с целью недопущения или снижения вредных последствий.

**Ситуация существующего облучения** отмечается при уже имеющемся облучении в течение ряда лет и требует постоянного контроля.

## **Надзор и контроль за обеспечением радиационной безопасности. Радиационный мониторинг**

Государственный надзор за реализацией мер по радиационной безопасности осуществляет Департамент по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. Его основными функциями являются:

- учет, контроль и регистрация источников ионизирующего излучения;
- организация и проведение проверок и мониторинга;
- контроль технических (технологических, поверочных) мероприятий.

За соблюдением Закона «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» в сфере обеспечения радиационной безопасности в Республике Беларусь проводится Государственный санитарный надзор. При его осуществлении проводится наблюдение за выполнением санитарных норм и правил, гигиенических нормативов при:

- воздействии радона и  $\gamma$ -излучения природных радионуклидов;
- медицинском облучении;
- воздействии ионизирующей радиации в ходе выполнения работ с ее источниками;
- обращении с радиоактивными отходами;
- производстве пищевых продуктов и потреблении питьевой воды.

Государственный санитарный надзор реализуется органами и учреждениями санитарно-эпидемиологической службы Министерства здравоохранения Республики Беларусь.

Законом «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате Чернобыльской катастрофы» (1991 г.) установлены три уровня контроля загрязненных радионуклидами территорий:

- государственный;
- ведомственный;
- производственный.

Указанный контроль проводится на территориях:

- загрязненных в результате Чернобыльской аварии (зона А);
- вероятного радиационного воздействия выбросов АЭС (зона Б);
- остальных (зона В).

Контроль радиоактивного загрязнения согласно «Положению о системе контроля радиоактивного загрязнения», утвержденному Постановлением Совета Министров Республики Беларусь 04.05.2015 г. № 372 обеспечивают:

✓ на республиканском уровне – Министерство по чрезвычайным ситуациям, Министерство здравоохранения, Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды, Государственный комитет по стандартизации;

✓ на ведомственном уровне – Министерство сельского хозяйства и продовольствия, Министерство лесного хозяйства, Министерство жилищно-коммунального хозяйства, Министерство энергетики, Белорусский республиканский союз потребителей обществ;

✓ на производственном уровне – организации и индивидуальные предприниматели, осуществляющие деятельность, связанную с контролем радиоактивного загрязнения в связи с катастрофой на Чернобыльской АЭС.

Широкое распространение источников ионизирующего излучения в науке, промышленности, медицине и сельском хозяйстве обуславливает необходимость мер не только государственного, но и *международного контроля* за исполнением требований радиационной безопасности.

В настоящее время действуют межправительственные (МАГАТЭ, НКДР, ЕВРАТОМ, ВОЗ, МОТ) и неправительственные (МКРЗ, ФИРЭ) международные организации. Их основной функцией является разработка рекомендаций по правовому регулированию использования источников ионизирующего излучения в различных странах.

Членами международного агентства по атомной энергии (*МАГАТЭ, IAEA*), созданного для сотрудничества в использовании ядерной энергии в мирных целях, являются более 120 государств, в том числе и Республика Беларусь. Названная организация разработала Международную конвенцию о ядерной безопасности, регулирующую безопасность размещенных на суше гражданских атомных станций.

Сбор, изучение, анализ и распространение данных о природной и антропогенной радиоактивности окружающей среды, а также последствиях такого облучения производит Научный комитет по действию атомной радиации (*НКДАР ООН, UNSCEAR*), образованный Генеральной Ассамблеей ООН.

Обоснованием принципов радиационной защиты и публикацией рекомендаций занимается Международная комиссия по радиологиче-



ской защите (*МКРЗ, ICRP*). Национальные комиссии по радиологической защите (*НКРЗ*) на основе рекомендаций МКРЗ разрабатывают регламенты облучения в своих странах с учетом научно-технических возможностей, своеобразия социально-экономических и природных условий.

**Национальная комиссия Беларуси по радиационной защите** при Совете Министров Республики Беларусь является межотраслевым научно-экспертным и рекомендательно-консультативным органом по проблемам радиационной безопасности, радиационной защиты и радиационного контроля. Основными задачами комиссии являются:

- анализ и оценка научных данных;
- подготовка рекомендаций республиканским органам государственного управления, государственным научным организациям.

Состояние среды и эффективность мероприятий по охране ее от загрязнения контролируются в процессе **мониторинга окружающей среды**. Мониторинг представляет систему наблюдений, оценок и прогноза состояния природной среды и явлений, биологических ответов на трансформацию окружающей среды под воздействием экологических факторов. В республике существует Национальная система мониторинга окружающей среды. Главная ее цель – обработка данных о состоянии окружающей среды и обеспечение ею заинтересованных министерств и ведомств с целью выбора стратегии природопользования и принятия управленческих решений. Национальная система мониторинга окружающей среды, наряду с биологическим, экологическим, социально-гигиеническим мониторингом, включает и радиационный мониторинг. Под **радиационным мониторингом** понимают систему наблюдений, оценок и прогноза состояния среды обитания под воздействием радиационного фактора. В процессе радиационного мониторинга измеряют мощность экспозиционной дозы, плотность потока частиц, концентрацию радионуклидов в воде, воздухе, почве, продуктах питания, живых организмах, в том числе человеке.

Радиационный мониторинг включает:

- мониторинг *источников* (измерение активности выбросов радионуклидов в окружающую среду, а также мощности дозы внешнего облучения от источников, имеющих отношение к установке либо деятельности);
- мониторинг *окружающей среды* (определение мощности дозы внешнего облучения от источников в окружающей среде, а также концентраций радиоактивных веществ в экологических средах);

- мониторинг *рабочего места*.

В *систему радиационного мониторинга* входят радиационные пункты наблюдений и аккредитованные лаборатории. Сеть постоянного мониторинга окружающей среды Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды включает реперные площадки и ландшафтно-геохимические полигоны. Метеорологическая сеть проводит радиационный мониторинг приземного слоя атмосферы, в том числе измерения мощности экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения, измерения радиоактивных выпадений из атмосферы и радиоактивных аэрозолей. На гидрологических постах больших и средних рек республики, протекающих через загрязненные радионуклидами территории, осуществляется мониторинг поверхностных вод. В зонах потенциального влияния АЭС смежных государств (Чернобыльской, Смоленской, Ровенской и Игналинской) радиационный контроль обеспечивают автоматические системы контроля радиационной ситуации. Радиационный мониторинг лесных территорий включает измерение мощности дозы  $\gamma$ -излучения, содержания радионуклидов в почве, удельной активности и проводится на стационарных пунктах в различных типах леса и зонах радиоактивного загрязнения.

В республике сформирована и эффективно работает система радиационного контроля пищевых продуктов, продовольственного и сельскохозяйственного сырья, пищевой и другой продукции леса. Радиационному контролю подлежит вся продукция, производимая и произрастающая на территории радиоактивного загрязнения. На каждую партию продукции в обязательном порядке оформляется документ, удостоверяющий соответствие содержания радионуклидов установленным уровням.

### **Радиационная безопасность в условиях планируемого облучения**

*К ситуациям планируемого облучения* относится практическая деятельность по:

- производству ядерной энергии, а также производству, поставке и перевозке радиоактивных веществ;
- добыче и переработке полезных ископаемых;
- работе с радиоактивными отходами;
- применению излучений и радиоактивных веществ в медицине, промышленности, ветеринарии и сельском хозяйстве.

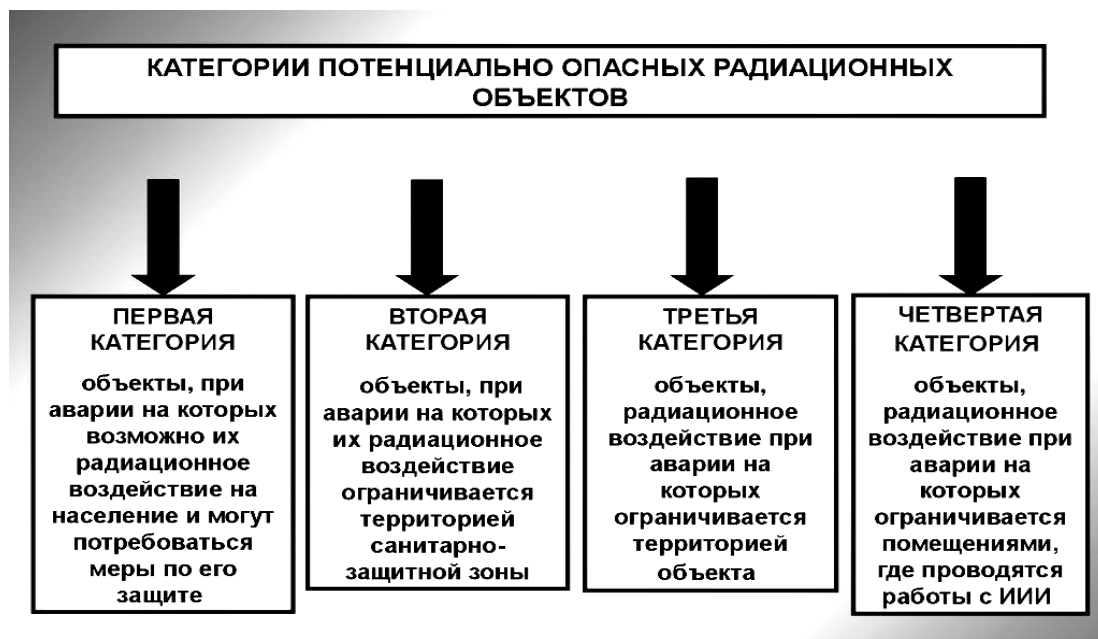
Указанная деятельность осуществляется *на радиационных объ-*

*ектах*, под которыми понимают объекты, реализующие обращение с техногенными источниками ионизирующей радиации. Формируют планируемое облучение ядерные, медицинские и ветеринарные радиационные устройства, а также установки для добычи и переработки минеральных руд, переработки радиоактивных веществ, работы с радиоактивными отходами. Особое внимание уделяется планируемому облучению при применении ионизирующих излучений и радионуклидов в *медицине*.

Объекты, занимающиеся изготовлением, хранением, транспортировкой, применением источников ионизирующей радиации и представляющие опасность для людей в виде возможного облучения персонала и населения и радиоактивного загрязнения окружающей среды называются *радиационноопасными*.

По потенциальному радиационному риску различают следующие категории объектов:

- ✓ I – с вероятным радиационным воздействием на население;
- ✓ II – с радиационным воздействием в санитарно-защитной зоне;
- ✓ III – с радиационным воздействием на территории;
- ✓ IV – с радиационным воздействием в помещениях (рисунок 4.2).



**Рисунок 4.2.** Классификация радиационных объектов по потенциальной радиационной опасности

По назначению радиационноопасные объекты делят на:

- объекты ядерного комплекса (ядерно-топливного цикла, с ядерными устройствами, с источниками ионизирующей радиации);
- пункты хранения ядерных материалов, а также радиоактивных веществ, отходов;
- базы ядерного оружия;
- загрязненные радионуклидами территории.

На радиационноопасных объектах используются **закрытые и открытые** источники излучения. Источник, конструкция которого исключает попадание находящихся в нем радионуклидов в окружающую среду в условиях эксплуатации, является **закрытым**. Работа с закрытыми источниками ионизирующего излучения может подвергать персонал только риску внешнего облучения.

Различают закрытые источники ионизирующего излучения **непрерывного и периодического действия**. К *первым* относится радиационная техника, в которой используются радионуклиды в закрытом виде, ко *вторым* – рентгеновские аппараты и ускорители заряженных частиц.

**Открытым** называют источник излучения, при использовании которого содержащиеся в нем радионуклиды могут попадать в окружающую среду. Работа с открытыми радиоактивными источниками может обусловить как внешнее, так и внутреннее облучение персонала в случае поступления радиоактивных изотопов в рабочую зону в виде газов, аэрозолей, твердых и жидких радиоактивных отходов.

Различают открытые источники, на которых применение радиоактивных веществ в открытом виде предусмотрено технологией производства (лаборатории, предприятия и учреждения), и открытые источники, на которых радиоактивные вещества в открытом виде образуются как неизбежные или побочные продукты технологического процесса (предприятия по добыче и переработке радиоактивных руд, атомные электростанции, экспериментальные реакторы, ускорители заряженных частиц).

Максимальная активность дочернего радионуклида, который извлекается путем пропускания определенной жидкости, обуславливает 3 класса работ с использованием открытых источников (таблица 4.1).

Радиационное воздействие на *население* в условиях планируемого облучения может быть обусловлено:

- внешним облучением от радиоактивного облака, загрязненных радионуклидами поверхностей;

- внутренним облучением при попадании в организм радиоактивных веществ с вдыхаемым воздухом и потреблении пищи и воды, загрязненных радионуклидами;
- контактным облучением за счет контаминации кожных покровов радиоактивными веществами.

**Таблица 4.1** – Классы работ с открытыми источниками ионизирующего излучения

Класс работ	Суммарная активность на рабочем месте, приведенная к группе А, Бк
I	более $10^8$
II	от $10^5$ до $10^8$
III	от $10^3$ до $10^5$

Примечание: группа А – активность меньше  $10^3$  Бк.

При обеспечении радиационной безопасности в условиях планируемого облучения при нормальной эксплуатации источников ионизирующего излучения руководствуются принципами **нормирования, обоснования, оптимизации**.

В соответствии с Законом «О радиационной безопасности населения» и Санитарными нормами и правилами «Требования к радиационной безопасности» влияние ионизирующей радиации в условиях планируемого облучения нормируется две *категории облучаемых лиц*:

- персонал;
- все население, а также персонал вне сферы его профессиональной деятельности.

Для категорий облучаемых лиц установлены следующие нормативы:

- ✓ основные пределы доз облучения;
- ✓ граничные дозы;
- ✓ производные от основных пределов доз облучения – допустимые уровни монофакторного воздействия (пределы годового поступления, допустимые среднегодовые объемные активности, среднегодовые удельные активности).

**Пределом дозы** называется величина годовой эффективной или эквивалентной дозы техногенного облучения. Соблюдение этого норматива предотвращает появление детерминированных эффектов и уменьшает риск стохастических эффектов до приемлемого уровня.

Основные пределы доз облучения установлены Гигиеническим

нормативом «Критерии оценки радиационного воздействия» (таблица 4.2).

Дополнительные ограничения вводятся для женщин до 45 лет, работающих с источниками ионизирующего излучения. В этом случае эквивалентная доза на поверхности нижней части области живота не должна превышать в месяц 1 мЗв, поступление радионуклидов в организм за год –  $1/20$  предела годового поступления для персонала.

**Таблица 4.2** – Основные пределы доз облучения

Нормируемые величины	Пределы доз для:	
	персонала	населения
Эффективная доза	в среднем 20 мЗв в год за любые последовательные 5 лет (но не выше 50 мЗв в год)	в среднем 1 мЗв в год за любые последовательные 5 лет (но не более 5 мЗв в год)
Эквивалентная доза в хрусталике глаза за год	в среднем 20 мЗв в год за любые последовательные 5 лет (но не более 50 мЗв в год)	15 мЗв
Эквивалентная доза в коже за год	500 мЗв	50 мЗв
Эквивалентная доза в кистях и стопах за год	500 мЗв	50 мЗв

Заблаговременно ограниченная индивидуальная доза облучения от определенного источника, обеспечивающая базовый уровень защиты, называется **граничной дозой** и необходима для установления верхней границы диапазона доз.

Граничной при облучении населения является доза, значение которой находится на верхней границе годовых доз облучения населения в условиях плановой эксплуатации источника ионизирующего облучения.

Оптимальной нижней границей дозы облучения для населения в режиме обычной работы АЭС считается минимально значимая доза облучения, равная 10 мкЗв/год.

**Допустимые уровни монофакторного воздействия** не должны выходить за пределы доз 20 мЗв в год для персонала и 1 мЗв в год для населения.

С целью планирования и реализации **мероприятий, направленных на предупреждение радиационной аварии** во время нормальной эксплуатации радиационноопасных объектов в районе проводят:

- сбор сведений и формирование банка данных о радиационно-опасных объектах;
- мониторинг окружающей среды;
- оценку риска радиационной аварии;
- разработку и внедрение мер по предотвращению и устранению радиационных аварий;
- подготовку управления, сил и средств на случай аварии;
- создание материальной базы для ликвидации последствий радиационной аварии;
- обучение населения методам защиты и действиям при чрезвычайных ситуациях;
- подготовку населения к эвакуации на безопасные территории.

На радиационноопасных объектах постоянно осуществляются следующие мероприятия:

- выполнение правил эксплуатации в штатном режиме;
- контроль исправности систем и элементов безопасности объектов;
- разработка плана мероприятий и инструкций на случай радиационной аварии;
- подготовка средств защиты, санитарной обработки, профилактики и оказания первой помощи;
- контроль функционирования системы экстренного оповещения;
- подготовка квалифицированного персонала, в том числе специализированных аварийных бригад для ликвидации аварии и ее последствий.

Персонал аварийных бригад обеспечивается:

- перечнем радиационных аварий с прогнозом их последствий;
- критериями принятия решений при возникновении радиационной аварии;
- планом мероприятий по защите от последствий аварии персонала и населения;
- средствами оповещения и ликвидации последствий аварии;
- средствами профилактики радиационных поражений и оказания помощи пострадавшим.

В *режиме повышенной готовности* проводятся следующие меры:

- выявление аномалий и их устранение;
- управление объектом при отклонениях в работе;

- усиление контроля и надзора за радиационной обстановкой на объекте и окружающей среде;
- проверку готовности средств защиты, санитарной обработки, профилактики и оказания первой помощи персонала;
- прогноз масштаба аварии;
- выяснение причин ухудшения радиационной обстановки;
- уточнение планов действий и приведение необходимых сил и средств в состояние готовности;
- защита населения и окружающей среды;
- организация при необходимости эвакуации.

В режиме повышенной готовности проводят *инженерную, радиационную и медицинскую* защиту населения. **Инженерная** защита включает подготовку убежищ и противорадиационных укрытий, **радиационная** – подготовку средств индивидуальной защиты, коммунально-бытовых объектов и транспорта для санитарной обработки и дезактивации, предупреждение радиационного загрязнения продуктов питания, пищевого сырья, кормов животных, источников и запасов воды, **медицинская** – подготовку организаций здравоохранения к приему пострадавших, организацию профилактики, контроль загрязненных продуктов питания, пищевого сырья, воды и водоисточников.

К **планируемому медицинскому облучению** относят профилактическое, диагностическое, лечебное и исследовательское облучения. Влияние ионизирующего излучения при планируемом медицинском облучении **пациентов** может быть обусловлено:

- внешним облучением от радиоактивно загрязненных оборудования, источников излучения, поверхностей помещений, в которых производится манипуляция;
- внутренним облучением при поступлении радионуклидов с вдыхаемым воздухом;
- контактным облучением в случае случайного загрязнения радиоактивными веществами кожи.

На **персонал** в условиях планируемого медицинского облучения может влиять:

- ✓ внешнее облучение от контаминированных радиоактивными веществами поверхностей и оборудования рабочих помещений, источников излучения, пациентов, выделений пациентов;
- ✓ внутреннее облучение, обусловленное вдыханием находящихся в воздухе радиоактивных веществ;
- ✓ контактное облучение из-за загрязнения радионуклидами



кожных покровов, спецодежды, средств индивидуальной защиты.

В случае планируемого медицинского облучения радиационная безопасность обеспечивается достижением максимальной пользы от *рентгенорадиологических манипуляций (принцип обоснования)* и всесторонним доведением радиационного ущерба до минимума при безусловном превосходстве пользы для облучаемых лиц над вредом (*принцип оптимизации*). При этом осуществляющие рентгенорадиологическую диагностику и терапию медицинские работники обязаны поддерживать индивидуальную дозу облучения пациента на возможно низком уровне, предупреждая тем самым возможные последствия для здоровья.

Диагностическое облучение пациентов проводят строго по медицинским показаниям (если в данном случае другие методы диагностики не существуют, неинформативны, либо их нельзя применить в отношении конкретного пациента), по назначению врача-специалиста и с письменного согласия пациента. Окончательное решение о проведении назначенной процедуры принимает выполняющий ее врач-радиолог-рентгенолог. Необоснованные назначения и повторения рентгенорадиологических процедур исключаются. Методики проведения рентгенорадиологических манипуляций утверждаются Министерством здравоохранения Республики Беларусь и должны гарантировать отсутствие у пациентов детерминированных лучевых эффектов.

С целью предотвращения излишнего необоснованного облучения населения рекомендуются допустимые контрольные уровни для пациентов, нуждающихся в разной степени рентгенологической и радиологической помощи. В настоящее время выделяют три категории пациентов в зависимости от цели рентгенодиагностических исследований и показаний к их проведению.

Пациентов, которым рентгенодиагностическое обследование назначено в связи с подозрением онкологического заболевания или его наличием, а так же в практике состояний, требующих срочной помощи с кровотечениями, травмами, относят к *категории АД*. При этом облучение в рекомендованном дозовом контрольном уровне не должно обуславливать лучевых поражений.

В случае, если названные исследования осуществляются по клиническим показаниям для установления, уточнения диагноза либо выбора метода лечения при неонкологической патологии, пациенты относятся к *категории БД*. С целью предотвращения риска стохастич-

ческих последствий облучения для данной категории дозовый контрольный уровень снижается в 10 раз по сравнению с категорией АД.

К **категории ВД** относят пациентов, которым обследование назначено с целью профилактики, а также после лечения злокачественных опухолей. В эту категорию также включены лица с предопухоловой патологией (лейкоплакия, фиброаденома), работающие в условиях, связанных с влиянием ионизирующей радиации.

При рентгенодиагностических исследованиях для пациентов рекомендуются следующие величины дозовых контрольных уровней (таблица 4.3).

**Таблица 4.3** – Рекомендуемые дозовые контрольные уровни облучения для разных категорий пациентов

Категории	Дозовый контрольный уровень, мЗв/год
АД	150
БД	15
ВД	1,5

Беременным женщинам, относящимся к категориям БД и ВД и детям до 15 лет, относящимся к категории ВД, рентгенодиагностические исследования назначают только по жизненным показаниям.

Медицинское облучение не производится в следующих случаях:

- ✓ нет соответствующего назначения врача-специалиста;
- ✓ облучение не запланировано программой профилактического медицинского осмотра;
- ✓ нет обоснования облучения консультацией между врачом-радиологом-рентгенологом и направляющим врачом-специалистом;
- ✓ врач-радиолог-рентгенолог отказывается нести ответственность за безопасность пациента;
- ✓ пациент не имеет информации о пользе назначенной процедуры и не предупрежден о связанных с облучением рисках.

При назначении медицинских радиодиагностических исследований *пациенткам детородного возраста* обязательно учитывают фазы менструального цикла. Беременным женщинам и кормящим матерям исследования с использованием открытых источников излучения проводят только по жизненным показаниям.

Годовая эффективная доза облучения в случае проведения профилактических рентгенологических исследований населения и обоснованных рентгенорадиологических обследований персонала должна

быть не более 1 мЗв.

С целью уменьшения облучения персонала введены *граничные дозы*, пациентов – *диагностические референтные уровни* и *граничные дозы*, зависящие от условий медицинского облучения при рентгенологической диагностике (таблица 4.4).

Дозы облучения пациента от проведения каждого рентгенорадиологического исследования вносятся в утвержденные Министерством здравоохранения формы учетной медицинской документации и направляются в установленном порядке в государственный дозиметрический регистр. В республике сформирована ***единая государственная система контроля и учета индивидуальных доз облучения*** для контроля и учета индивидуальных доз облучения населения, полученных в результате медицинских исследований.

**Таблица 4.4** – Рекомендуемые диагностические референтные уровни при медицинском облучении для взрослых пациентов

Область обследования	Проекция	Доза на один снимок, мГр
Поясничная область позвоночника	Передняя – задняя	10
	Латеральная	30
	Пояснично-крестцового сустава	40
Область живота, внутривенная урография и холецистография, бедренный сустав	Передняя – задняя	10
Грудная клетка	Задняя – передняя	0,4
	Латеральная	1,5
Череп	Задняя – передняя	5
	Латеральная	3

Необходимо подчеркнуть, что при работе с закрытыми источниками метод защиты ***количеством*** ограничен требованиями технологического процесса. Защита ***временем*** находит особенно частое применение при работе с источниками относительно малой активности, при прямых манипуляциях с ними персонала. Велика значимость временного фактора при использовании рентгеновских аппаратов в медицинской практике. Повышение квалификации врачебных кадров позволяет сократить время работы аппарата и уменьшить дозовые нагрузки персонала и обследуемых пациентов. Защита ***расстоянием*** обеспечивается достаточным по эргономическим соображениям уда-

лением работающих от излучателя, применением удлиненного инструментария, манипуляторов различного вида, средств малой механизации, дистанционного управления и роботизации производства.

При работе с мощными источниками ионизирующей радиации необходима комбинированная защита расстоянием и *экранами*. В зависимости от вида ионизирующих излучений для изготовления экранов применяются различные материалы, а их толщину определяет мощность излучений. Лучшими материалами для защиты от рентгеновского и  $\gamma$ -излучений являются свинец и уран. С учетом их стоимости на практике применяют экраны из просвинцованного стекла, железа, бетона, баритобетона, железобетона и воды. Строительные материалы часто используются для изготовления экранов, когда одновременно являются строительными конструкциями зданий. Довольно часто для создания экранов на практике используют воду, которая является дешевым защитным материалом.

### **Радиационная безопасность в ситуации аварийного облучения**

Аварийное облучение может произойти на устройствах:

- содержащих радиоактивные вещества и генераторы излучений (ядерных, медицинских, ветеринарных);
- для обращения с радиоактивными отходами;
- для переработки радиоактивных веществ;
- для добычи и переработки минеральных руд.

В результате потери управления указанными радиационными устройствами вследствие неисправности оборудования, ошибочных действий персонала, природных катастроф либо других причин может произойти *радиационное событие* – загрязнение радионуклидами среды обитания, облучение персонала и/или населения.

Различают *ядерные, радиоизотопные и электрофизические радиационные события*. Ядерные события могут произойти на ядерных реакторах атомных электростанций, транспортных средств, радиоизотопные – на полигонах для захоронения радиоактивных отходов, в радиоизотопных лабораториях, блоках радиоизотопной диагностики радиологических отделений, электрофизические – на синхротронах, бетатронах, рентгеновских аппаратах в промышленных и исследовательских лабораториях, рентгенологических и радиологических отделениях больниц.

В результате радиационных событий могут возникать ситуации облучения, включающие **радиационные происшествия** и **радиационные аварии**. В случае если потеря управления источником излучения приводит к облучению людей или радиоактивному загрязнению среды обитания в дозах, превышающих контрольные уровни, но не регламентированных гигиеническими нормативами, говорят о **радиационном происшествии**. **Радиационная авария** обуславливает облучение людей выше установленных нормативов и радиоактивное загрязнение среды обитания.

В зависимости от масштаба распространения радиоактивных веществ и радиационных последствий различают аварии *локальные* (в пределах объекта), *местные* (в пределах санитарно-защитной зоны), *территориальные* (за пределами санитарно-защитной зоны) и *глобальные* (за пределами государства).

В зависимости от вида радиационноопасного объекта различают *аварии*:

- на предприятиях ядерно-топливного цикла;
- на объектах с ядерными установками;
- при перевозке радиоактивных грузов;
- с источниками ионизирующего излучения;
- с ядерным оружием;
- на загрязненных радиоактивными веществами территориях.

Различают также аварии *проектные* с предусмотренными исходными и начальными событиями и инженерно-техническими системами безопасности, и *запроектные*, не предусмотренные проектом.

Радиационные аварии, не связанные с атомными электростанциями, в зависимости от последствий делят на пять групп:

- 1-я – не приводящие к облучению персонала, населения или загрязнению среды обитания аварии;
- 2-я – внешнее облучение превышает дозовый предел;
- 3-я – загрязнение радионуклидами производственной или среды обитания превышает допустимые уровни;
- 4-я – дозы внешнего и внутреннего облучения персонала и населения превышают нормативы;
- 5-я – происходит внешнее и внутреннее облучение персонала, населения, а также загрязнение среды обитания.

Выделяют три последовательные стадии радиационных аварий:

- раннюю;
- промежуточную;

- позднюю.

**Ранняя стадия** протекает с момента аварии до прекращения выброса в атмосферу радионуклидов и завершения формирования на местности радиоактивного следа, **промежуточная** – от окончания формирования радиоактивного следа до принятия необходимых мер защиты населения, **поздняя** – от принятия всех необходимых мер до полного устранения последствий аварии в течение многих лет.

Среди **радиационных** наиболее значимы события на ядерных реакторах. В 1990 г. МАГАТЭ и ЕВРАТОМ была предложена **Международная шкала ядерных событий**, включающая отклонения, происшествия и аварии с уровнем 0-7 (рисунок 4.3). Отклонениями являются незначительные, не оказывающие влияние на радиационную безопасность, события с уровнем ниже 0. К происшествиям относят аномалию (уровень 1), инцидент (уровень 2), серьезный инцидент (уровень 3). Аварии включают аварии локальные (4 уровень), аварии с широкими последствиями (5 уровень), аварии серьезные (6 уровень), аварии крупные (7 уровень).



**Рисунок 4.3.** Международная шкала ядерных событий (INES)

Анализ ядерных событий производится по трем критериям безопасности:

- ухудшение глубокоэшелонированной защиты реактора;

– влияние за пределами площадки на здоровье населения и окружающую среду;

– влияние в пределах площадки (от существенного загрязнения поверхностей и облучения персонала до повреждения активной зоны ядерного реактора).

С учетом указанных критериев безопасности шкалу ядерных событий можно представить в следующем виде (таблицы 4.5, 4.6).

**Таблица 4.5 – Международная шкала ядерных событий**

Уровень	Название	Описание
< 0	Отклонение	Не существенные для безопасности события, при которых не нарушаются эксплуатационные пределы и условия, и которые устраняются адекватными процедурами. Отмечается небольшое распространение загрязнений в контролируемых зонах, облучение персонала не существенно. Часто наблюдается в виде случайных отказов в резервируемой системе, запланированных и нормально осуществленных быстрых остановок реактора.
1	Аномалия	Не существенное для безопасности происшествие с нарушением режима эксплуатации, но с существенным сохранением глубокоэшелонированной защиты. Отмечается небольшое распространение загрязнений в контролируемых зонах, облучение персонала не существенно. Часто наблюдается при отказе оборудования, ошибке персонала, транспортировке радиоактивного материала, обращении с топливом, хранении отходов.
2	Инцидент	Происшествие со значительными нарушениями мер обеспечения безопасности, незначительными нарушениями глубокоэшелонированной защиты при сохранении достаточной глубокоэшелонированной защиты. Отмечается значительное радиоактивное загрязнение среды, облучение персонала в превышающей годовой дозовый предел дозе. Часто наблюдается при отказе устройств безопасности.
3	Серьезный инцидент	Происшествие с разрушением глубокоэшелонированной защиты, отказом систем безопасности, повреждением активной зоны ядерного реактора. Отмечается обширное распространение загрязнения, внешний выброс формирует дозу облучения за пределами площадки порядка десятых долей мЗв. Очень малый выброс: облучение населения на уровне долей ус-

Уро- вень	Название	Описание
		тановленных пределов. Острые лучевые поражения персонала. Наблюдался на АЭС Вандельос, 1989 г.
4	Авария в пределах АЭС	Локальная авария со значительным повреждением или расплавлением активной зоны ядерного реактора. Отмечается обширное распространение загрязнения, внешний выброс формирует дозу облучения за пределами площадки порядка нескольких мЗв. Незначительный выброс: облучение населения на уровне долей установленных пределов. Облучение персонала с высокой вероятностью летального исхода. Наблюдалась на заводе по переработке топлива, Уиндскейл, 1973 г., АЭС Сен-Лоран, 1980 г.
5	Авария с риском за пределами АЭС	Авария с повреждением большей части активной зоны ядерного реактора, пожаром или взрывом с выбросом радиоактивных веществ в зоне установки. Отмечается внешний выброс радионуклидов за пределами площадки от сотен до тысяч тераБк йода-131. Ограниченный выброс: облучение населения на уровне долей установленных пределов. Облучение персонала с летальным исходом. Наблюдалась на реакторе в Уиндскейл, 1957 г., АЭС Три-Майл-Айленд, 1979 г.
6	Серьезная авария	Авария с тяжелым повреждением всей активной зоны реактора, сильным пожаром или взрывом с выбросом радиоактивных веществ в зоне установки. Отмечается внешний выброс радионуклидов за пределами площадки от тысяч до десятков тысяч тераБк йода-131. Значительный выброс: облучение населения на уровне долей установленных пределов. Облучение персонала с летальным исходом. Наблюдалась на заводе по переработке топлива, ПО «Маяк», Южный Урал, Россия, 1957 г.
7	Крупная авария	Авария с тяжелым повреждением активной зоны и разрушением реактора, крупным пожаром или взрывом с выбросом радиоактивных веществ в зоне установки. Отмечается внешний выброс из активной зоны ядерного реактора смеси коротко- и долгоживущих радиоактивных продуктов деления за пределами площадки десятками тысяч и выше тераБк I-131. Крупный выброс: острое и отдаленное воздействие на здоровье населения на территории нескольких стран, долговременные экологические последствия. Облучение персонала с летальным исходом.



Уро- вень	Название	Описание
		Наблюдалась на Чернобыльской АЭС, 1986 г.

**Таблица 4.6 – Шкала ядерных событий Росатома**

	Балл	Обозна- чение	Последствия, обстоятельства и признаки наруше- ний в работе АЭС
Аварии	7	A01	Авария с выбросом в окружающую среду большой части РВ, накопленных в активной зоне, в результате которого будут превышены ПД для запроектных аварий. Возможны острые лучевые поражения. Последующее влияние на здоровье населения, проживающего на большой территории с возможностью трансграничного переноса радиоактивных загрязнений, длительное воздействие на окружающую среду.
	6	A02	Авария с выбросом в окружающую среду большого количества РВ, накопленных в активной зоне, в результате которого ПД для проектных аварий будут превышены.
	5	A03	Авария с выбросом в окружающую среду продуктов деления, приводящих к незначительному превышению ПД для проектных аварий.
	4	A04	Авария с выброс РВ в окружающую среду в количествах, превышающих значение для происшествий категории П01, но в результате которого не превышены ПД для населения при проектных авариях. Возможно облучение персонала дозами (порядка 3в), вызывающими острые лучевые поражения.
Происшеств- вия	3	П01	Происшествие с выбросом в окружающую среду РВ без нарушений пределов безопасной эксплуатации. Загрязнение помещений и оборудования выше уровней, установленных проектом для нормальной эксплуатации, или облучение персонала превышающими ПД.

Примечание: РВ – радиоактивные вещества; ПД – предел дозы.

На ядерных энергетических установках в результате аварийного выброса на здоровье населения и персонала оказывают влияние:

- ✓ внешнее облучение от радиоактивного облака и радиоактивно загрязненных поверхностей;
- ✓ внутреннее облучение, обусловленное вдыханием содержащихся в воздухе радиоактивных веществ и при потреблении загрязненных радионуклидами воды и продуктов питания;
- ✓ контактное облучение по причине загрязнения радиоактив-

ными веществами кожных покровов, спецодежды, средств индивидуальной защиты.

Основными задачами системы радиационной безопасности при *радиационной аварии* являются предотвращение возникновения детерминированных эффектов и снижение до минимума вероятности стохастических эффектов. При этом учитывается, что:

- степень вмешательства должна предотвращать ранние и ограничивать поздние медицинские последствия облучения;
- мероприятия по ликвидации последствий радиационной аварии должны приносить больше пользы, чем вреда;
- польза от снижения дозы ионизирующей радиации после ликвидации последствий радиационной аварии должна была максимальной.

Обнаружение радиационной аварии инициирует экстренные меры, способствующие прерыванию ее формирования, возобновлению контроля над источником излучения, а также снижению доз облучения и количества облученных людей, радиоактивного загрязнения рабочей зоны и окружающей среды, экономического и социального ущерба, обусловленных радиационной аварией до возможно минимальных значений.

Допустимые уровни повышенного облучения персонала радиационного объекта, а также специалистов аварийно-спасательных служб и формирований, участвующих в проведении аварийно-восстановительных работ, представлены в таблице 4.7.

**Таблица 4.7** – Допустимые уровни доз облучения для аварийных работников

Вид мероприятия	Уровень дозы облучения
Спасение людей Предотвращение тяжелых детерминированных эффектов Предотвращение развития катастрофы	Десятикратное значение предела дозы профессионального облучения в течение отдельного года 500 мЗв
Предотвращение высоких коллективных доз	Двукратное значение предела дозы профессионального облучения в течение отдельного года 100 мЗв

Для случаев острого облучения, при которых необходимы срочные меры реагирования в целях предотвращения или минимизации тяжелых детерминированных эффектов, а также для мер реагирования, принимаемых в ситуациях аварийного облучения с целью сни-

жения риска стохастических эффектов, разработаны общие критерии (таблица 4.8, 4.9).

**Таблица 4.8** – Общие критерии реагирования для предотвращения или сведения к минимуму тяжелых детерминированных эффектов

Внешнее облучение (< 10 ч)		
Средняя поглощенная доза в:		При вероятности облучения: немедленно принять предупредительные меры для удержания доз облучения ниже общих критериев, обеспечить информирование и предупреждение населения, провести срочную дезактивацию.
- костном мозге	1 Гр	
- плоде	0,1 Гр	
- ткани	25 Гр на глубине 0,5 см	
- коже	10 Гр на 100 см <sup>2</sup>	
Внутреннее облучение (30 дней)		
Средняя поглощенная доза в:		При облучении: немедленно провести медицинское обследование, назначить лечение, осуществить контроль радиоактивного загрязнения, при возможности провести декорпорацию, обеспечить регистрацию, обеспечить консультации психологов.
- костном мозге	0,2 Гр (РН с АН $\geq 90$ )	
- щитовидной железе	2 Гр (РН с АН $\leq 89$ )	
- легких	30 Гр	
- толстой кишке	20 Гр	
- плоде	0,1 Гр	

Примечание: РН – радионуклиды, АН – атомный номер.

**Ликвидация радиационных аварий и их последствий** требует направленных на предупреждение попадания радионуклидов за пределы загрязненной территории, защиту населения от вредного влияния аварийных факторов и восстановление условий жизнедеятельности аварийно-спасательных работ.

На территории аварии проводится два вида **аварийно-спасательных работ**, перечень которых определяется техническим состоянием объекта, степенью радиоактивного загрязнения объекта и окружающей среды, а также стадией аварии: первоочередные работы и ликвидация последствий аварии на объекте и пострадавшей территории.

Для *предотвращения и снижения облучения* населения при радиационной аварии с выбросом радионуклидов в окружающую среду, проводятся **меры радиационной защиты**, направленные на:

- предупреждение облучения;
- снижение интенсивности и дозы воздействия ионизирующей радиации на человека;

- устранение либо ограничение путей внутреннего облучения;
- защиту клеток, тканей и органов у облучаемых людей.

**Таблица 4.9** – Общие критерии реагирования с целью снижения риска стохастических эффектов

Общие критерии	Прогнозируемая доза	Мероприятия
Эквивалентная доза облучения щитовидной железы вследствие поступления изотопов йода в организм за первые 7 дней	50 мЗв	Блокировка щитовидной железы стабильным йодом, если: во время аварии произошел выброс радиоактивного йода, до или сразу после выброса радиоактивного йода, только в течение короткого периода сразу после поступления радиоактивного йода в организм
Эффективная доза внешнего и внутреннего облучения за первые 7 дней	100 мЗв	Укрытие, эвакуация, дезактивация, ограничение потребления пищевых продуктов, молока и воды, контроль радиоактивного загрязнения, информирование населения
Эквивалентная доза облучения зародыша или плода за первые 7 дней	100 мЗв	
Эффективная доза облучения за год	100 мЗв	Временное переселение, дезактивация, завоз чистых пищевых продуктов, молока и воды, информирование населения
Эквивалентная доза облучения зародыша или плода за период внутриутробного развития	100 мЗв	
Эффективная доза за месяц	100 мЗв	Скрининг, основанный на эквивалентных дозах облучения определенных радиочувствительных органов (основание для медицинского наблюдения), консультирование по основным вопросам
Эквивалентная доза облучения зародыша или плода за период внутриутробного развития	100 мЗв	Консультирование для принятия обоснованных решений в особых случаях

Основными *мерами защиты* являются:

- информирование населения о радиационной ситуации;
- укрытие;
- йодная профилактика;

- использование специальных (респиратор, противогаз) или подручных (носовые платки, полотенца, бумажные салфетки) средств защиты органов дыхания;
- регулирование доступа в аварийную зону;
- зонирование территории, загрязненной радионуклидами;
- особая санитарная обработка;
- дезактивация территорий, зданий и сооружений;
- герметизация помещений на время формирования радиоактивного загрязнения территории;
- захоронение радиоактивных отходов, образовавшихся в результате дезактивации, а также отходов производств с повышенным содержанием радионуклидов;
- медицинская помощь;
- запрещение либо ограничение потребления местных и загрязненных радионуклидами продуктов питания и воды;
- перепрофилирование в лесном и сельском хозяйстве с обеспечением безопасных условий труда;
- уменьшение содержания радионуклидов в сельхозпродукции и продуктах ее переработки, а также продукции личных подсобных хозяйств;
- благоустройство населенных пунктов;
- эвакуация;
- переселение.
- социальные и другие дополнительные меры.

Для оптимальной эффективности защитных мер их проводят в определенные стадии радиационной аварии. На *ранней стадии* оценивают радиационную обстановку, определяют первоочередность проведения спасательных работ, изолируют источник загрязнения, осуществляют мероприятия по предотвращению выброса радиоактивных веществ, защите персонала и населения, снижению распространения радиоактивного загрязнения на менее загрязненные или незагрязненные участки путем его удаления и (или) локализации.

На *промежуточной стадии* стабилизируют радиационную обстановку, проводят ее мониторинг, обеспечивают проведение мероприятий по ликвидации последствий аварии (до достижения контрольных уровней радиоактивного загрязнения) и защите лиц, живущих на загрязненных территориях.

*Поздняя стадия* радиационной аварии подразумевает завершение работ по устранению ее последствий, ликвидацию временных

пунктов хранения радиоактивных отходов или контроль их безопасности, обеспечение условий проживания людей без необходимости применения защитных мер.

Конкретные меры безопасности приведены в таблице 4.10.

**Таблица 4.10** – Меры безопасности в определенные стадии радиационных аварий

Осуществляемое мероприятие	Ранняя стадия	Промежуточная стадия	Поздняя стадия
Оповещение	да	нет	нет
Укрытие	да	да	нет
Йодная профилактика	да	да (нет)	нет
Применение средств индивидуальной защиты	да	нет (да)	нет
Контроль доступа в аварийную зону	да	да	да
Эвакуация	да	да	нет
Санитарная обработка	нет	да	да
Контроль продуктов питания и воды	нет	да	да
Временное переселение	нет	да	да
Удаление скота с загрязненных пастбищ	нет	да	да
Дезактивация территории	нет	нет	да

Когда заранее известно о вероятной угрозе радиоактивного загрязнения и при наличии времени для осуществления предпринимаются **превентивные меры** радиационной защиты, включающие укрытие населения, обеспечение средствами индивидуальной защиты и радиозащитными средствами, подготовка к эвакуации.

По возможности проведение всех мероприятий, кроме превентивных, основывается на данных дозиметрического контроля радиационной обстановки и определения коллективных доз облучения населения.

Для обеспечения максимального эффекта йодной профилактики содержащие стабильный йод средства принимают в кратчайшие сроки после аварии с выбросом изотопов радиоактивного йода. При профилактическом приеме средств со стабильным йодом за 6 ч до поступления радиоизотопов йода обеспечивается практически полная защита щитовидной железы. При более позднем приеме защитный эффект снижается и полностью исчезает (таблица 4.11).

Решение о начале проведения йодной профилактики принимается председателями комиссий по чрезвычайным ситуациям, оповеще-

ние населения осуществляется всеми видами связи с привлечением средств массовой информации. В первые сутки после объявления начала йодной профилактики снабжение населения содержащими стабильный йод лекарственными средствами производится круглосуточно в пунктах выдачи.

**Таблица 4.11 – Эффективность йодной профилактики**

<b>Начало йодной профилактики</b>	<b>Эффективность, %</b>
После подачи сигнала тревоги об угрозе поступления радиойода	90-95
До 2 ч после поступления радиойода	80-90
В течение 2-6 ч после поступления радиойода	60
В течение 6-24 ч после поступления радиойода	0

Уменьшение накопления радиоактивного йода при назначении йодсодержащих средств связано со снижением перехода ионов йода в органическую форму и синтезом тиреоидных гормонов (эффект Вольфа-Чайкова). При ежедневном приеме указанных средств защитные свойства сохраняются с кумулятивным эффектом, прием более 10 дней не рекомендуется.

Йод-индуцированную блокаду щитовидной железы проводят лекарственными средствами, содержащими стабильный йод: калия или натрия йодидом, раствором Люголя, 5 % раствором йода спиртовым, содержащим 2 % калия йодида, а также антиструмином по специальным схемам и согласно инструкциям по применению. При этом обязательно учитывают возможность развития побочного действия и противопоказания к применению названных лекарственных средств.

Таблетки калия йодида принимают по 125 мг 1 раз в день ежедневно до 10 дней после еды, запивая водой. Для приема можно использовать полтаблетки «радиозащитного средства № 2» из гнезда № 6 индивидуальной аптечки гражданской обороны. При отсутствии таблеток калия йодида применяют раствор йода спиртовой 5 % или раствор Люголя внутрь или наружно. Защитный эффект однократного приема длится 24 ч.

При приеме стабильного йода в 5 % случаев возможно действие в виде интратиреоидных (аутоиммунный тиреоидит, аденома щитовидной железы, рецидив диффузного токсического зоба) или экстра-тиреоидных эффектов в виде тошноты, рвоты, диареи, боли в животе

(чаще у детей) или затруднения дыхания, кожной сыпи (чаще у взрослых).

Под **дезактивацией** понимают процесс удаления радиоактивных веществ с различных поверхностей, жидкостей, продуктов. Ее *цель* – снизить радиоактивное загрязнение объектов ниже допустимых норм и обеспечить радиационную безопасность людей и экологическую безопасность биосферы. *Объектами* дезактивации являются почва, воздух, водоемы, посевы, пастбища, растения, животные, сооружения, дороги, транспорт, одежда, человек.

*Способы дезактивации объектов* подразделяются на:

- жидкостные;
- безжидкостные;
- комбинированные.

Разновидностью безжидкостного способа является *биологический*.

**Жидкостные** способы подразумевают использование воды под давлением, дезактивирующих растворов и пены, электрического поля, ультразвука, стирки, экстракции, сорбентов, **безжидкостные** – газа под давлением, пылеотсасывания, механического удаления загрязненного слоя, изоляции загрязненной поверхности, **комбинированные** – фильтрации, очистки с помощью щеток, ветоши, пара, специальных затвердевающих пленок.

Наиболее эффективно применение *окислительно-восстановительных* дезактивирующих средств и дезактивирующих средств *на основе поверхностно-активных веществ*.

Дезактивирующие средства, содержащие *сорбенты* (природные и синтетические), чаще используют для извлечения радионуклидов из газовой и водной среды, в виде добавок к другим дезактивирующим растворам и пленкообразующим материалам.

К основным методам **дезактивации зданий и сооружений** из кирпича, бетона и дерева относят обработку:

- водой под давлением;
- паром;
- металлической щеткой;
- пескоструйным аппаратом;
- латексными пленками;
- щеткой с песком после пылеотсасывания.

**Транспорт** дезактивируют последовательно на оборудованных шестью площадками с эстакадами пунктах специальной обработки (ПуСО) по определенной технологии, включающей очистку и обра-



ботку техники, в том числе моторно-ходовую часть с частичной разборкой, водной струей, водой под давлением, паром, парожидкостной струей, пленками, пескоструйными аппаратами, замену масел, прокладок и дозиметрический контроль.

Метод жидкостной или безжидкостной дезактивации *одежды* выбирают в соответствии с особенностями радиоактивного загрязнения и свойствами материалов, для чего одежду предварительно сортируют. Пыль удаляют с помощью пылесоса, щеток, выколачивания, вытряхивания, после чего одежду вымачивают 10 минут в 2 % растворе суспензии на основе глинистых сорбентов, затем стирают или используют экстракцию с помощью избирательных растворителей.

Дезактивацию *дорог* с твердым покрытием производят поливочно-моечными машинами городского коммунального хозяйства или другими специальными машинами. Их принцип работы состоит в удалении радионуклидов с твердого покрытия струей воды, подачи отработанной воды в резервуар, который подвергают захоронению. Чтобы исключить пылеобразование *грунтовые дороги* предварительно поливают водой, а затем используют уборочные машины для снятия верхнего слоя грунта. Если удаление грунта невозможно либо нецелесообразно, его засыпают чистым грунтом толщиной 8-10 см, бетонируют или асфальтируют.

Дезактивацию загрязненных сельскохозяйственных *угодий, лугов* проводят путем скашивания травы, при этом радиоактивность снижается на 25-40 %. Иногда целесообразна вспашка (мелкая до 30 см или глубокая до 70 см) лугов и засеивание их многолетними травами с последующим скашиванием и захоронением травы. Перепахивание снижает миграцию цезия и стронция из почвы в растения на 35-45 %.

Также дезактивация осуществляется окучиванием (после обработки растений опрыскиванием), одним из способов дезактивации угодий является использование сорбентов.

**Эвакуация** – это неотложное, временное перемещение людей с территории с целью предупреждения или уменьшения радиационного облучения в случае аварии. Перемещение на срок более двух месяцев называется *переселением*.

Решение об эвакуации детей и беременных женщин, облученных в дозе до 10 мЗв, принимается в случае мощности экспозиционной дозы 5 мР/час, взрослого населения, облученного в дозе до 50 мЗв, – 25 мР/час.

Эвакуация детей и беременных женщин за пределы 100-километровой зоны АЭС осуществляется при ожидаемой дозе на щитовидную железу 200 мЗв, иного населения – 500 мЗв.

### **Радиационная безопасность в условиях существующего облучения**

Условия существующего облучения отмечаются при нахождении в жилых и производственных зданиях, на загрязненных территориях, потреблении загрязненных радионуклидами воды и пищевых продуктов. Облучение населения и персонала в жилых и производственных помещениях происходит от природных радионуклидов, в том числе радона, содержащихся в почве участка застройки, строительных материалах и конструкциях, водопроводной воде и природном газе.

Для защиты от влияния природных радионуклидов людей в зданиях и сооружениях проводится комплекс защитных мероприятий на стадии проектирования, отвода земельного участка, а также строительства, приемки в эксплуатацию и эксплуатации. В частности, земельный участок для строительства выбирают с допустимым содержанием в почве радона и других природных радионуклидов, контролируют в строительных материалах, конструкциях, воздухе помещений, водопроводной воде, природном газе содержание радиоактивных веществ на этапе приемки в эксплуатацию и в период эксплуатации зданий.

При проектировании жилых и общественных зданий учитывается, что среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность дочерних продуктов радона и торона в воздухе помещений не должна быть выше 100 Бк/м<sup>3</sup>, в эксплуатируемых зданиях – не выше 200 Бк/м<sup>3</sup>, мощность эффективной дозы  $\gamma$ -излучения – 0,2 мкЗв/ч мощности дозы на открытой местности. В любых используемых строительных материалах эффективная удельная активность природных радионуклидов должна быть ниже 370 Бк/кг.

Контролю содержания радиоактивных веществ подлежат также питьевая вода, продовольственное сырье, пищевые продукты, контактирующие с ними материалы, оборудование и тара. Содержание Cs-137 нормируется в питьевой воде, молоке и молочных изделиях, мясе и мясных продуктах, овощах и фруктах, садовых и дикорастущих ягодах и грибах, а также специализированных продуктах детского питания в готовом для употребления виде, Sr-90 – в питьевой воде, молоке и цельномолочной продукции, картофеле и специализированных

продуктах детского питания в готовом для употребления виде (Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в пищевых продуктах и питьевой воде (РДУ-99) (таблица 4.12).

**Таблица 4.12** – Нормируемые величины цезия-137 и стронция-90 в воде и пищевых продуктах

№	Наименование продукта	Бк/кг, Бк/л
<b>Цезий-137</b>		
1	Вода питьевая	10
2	Молоко и цельномолочная продукция	100
3	Творог и творожные изделия	50
4	Масло коровье	100
5	Мясо и мясные продукты, в том числе:	
5.1	говядина, баранина и продукты из них	500
5.2	свинина, птица и продукты из них	180
6	Картофель	80
7	Хлеб и хлебобулочные изделия	40
8	Мука, крупы, сахар	60
9	Жиры растительные	40
10	Жиры животные и маргарин	100
11	Овощи и корнеплоды	100
13	Фрукты	40
14	Садовые ягоды	70
15	Дикорастущие ягоды и консервированные продукты из них	185
16	Грибы свежие	370
17	Специализированные продукты детского питания	37
<b>Стронций-90</b>		
1.	Вода питьевая	0,37
2.	Молоко и цельномолочная продукция	3,7
3.	Хлеб и хлебобулочные изделия	3,7
4.	Картофель	3,7
5.	Специализированные продукты детского питания	1,85

В результате Чернобыльской катастрофы примерно 23 % всей территории Республики Беларусь было загрязнено радионуклидами. Сейчас избыточному радиационному воздействию подвергается более 2 млн. человек пострадавших районов. Суммарная доза облучения, которую получает человек, складывается из внешнего и внутреннего облучения. При плотности загрязнения территории свыше 5 Ки/км<sup>2</sup>

превалирует *внешнее облучение*. *Внутреннее облучение* обеспечивается поступлением радионуклидов с пищей (около 94 %), с водой (около 5 %), вдыхаемым воздухом (около 1 %). Население загрязненных районов получает дозу преимущественно за счет внутреннего облучения.

*Особенностями формирования доз облучения населения*, проживающего на загрязненных территориях, являются пролонгированность облучения, обусловленная долгоживущими радионуклидами цезия, стронция и плутония в совокупности с короткоживущими, сформировавшими дозы облучения на раннем этапе аварии, более высокие дозовые нагрузки у сельских жителей загрязненных территорий по причине использования в пищу продуктов местного производства, более высокие дозовые нагрузки у детей (в 3-5 раз) из-за меньшего веса и более активных обменных процессов в детском организме.

С первого дня аварии на ЧАЭС законодательными и исполнительными органами власти Республики Беларусь приняты ряд мер по обеспечению радиационной безопасности населения. В настоящее время организацию и проведение мероприятий по защите людей регламентируют законы Республики Беларусь «О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на ЧАЭС» (22.02.1991 г., дополнение от 11.12.1991 г.) и «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на ЧАЭС» (12.11.1991 г.).

В соответствии с названными законами устанавливается правовой режим загрязненных территорий, разрабатываются мероприятия по снижению радиационного воздействия на население и экологические системы, а также природовосстановительные мероприятия с учетом рационального использования хозяйственного потенциала этих территорий.

Согласно закону «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС» правовой статус зоны радиоактивного загрязнения получили территории, на которых в результате аварии:

- ✓ образовалось долговременное загрязнение радионуклидами;
- ✓ доза облучения населения превышает 1 мЗв/год;
- ✓ невозможно получать чистую продукцию.

Если дополнительная доза облучения не превышает 1 мЗв/год сверх дозы от естественного фона считается, что условия проживания и трудовая деятельность населения не требует каких-то ограничений. При формировании дополнительной дозы облучения в диапазоне 1-5

мЗв/год проводятся защитные мероприятия, 5 мЗв/год и выше – отселение.

Вся загрязненная радионуклидами территория в зависимости от содержания в почве радионуклидов и величины среднегодовой эффективной дозы делится на 5 зон радиоактивного загрязнения (таблица 4.13).

**Таблица 4.13** – Зонирование загрязненной радионуклидами территории Республики Беларусь

Наименование зоны	Эффек- тивная доза, мЗв/год	Плотность загрязнения, кБк/м <sup>2</sup>		
		Cs-137	Sr-90	Pu-238, -239, -240
Проживания с периодическим радиационным контролем	<1	37-185 (1-5 Ки/км <sup>2</sup> )	5,55-18,5 (0,15-0,5 Ки/км <sup>2</sup> )	0,37-0,74 (0,01-0,02 Ки/км <sup>2</sup> )
Проживания с правом на отсе- ление	1-5	185-555 (5-15 Ки/км <sup>2</sup> )	18,5-74 (0,5-2 Ки/км <sup>2</sup> )	0,74-1,85 (0,02-0,05 Ки/км <sup>2</sup> )
Последующего отселения	>5	555-1480 (<15-40 Ки/км <sup>2</sup> )	74-111 (<3 Ки/км <sup>2</sup> )	1,85-3,7 (<0,1 Ки/км <sup>2</sup> )
Первоочередно- го отселения	>5	>1480 (> 40 Ки/км <sup>2</sup> )	>111 (> 3 Ки/км <sup>2</sup> )	>3,7 (> 0,1 Ки/км <sup>2</sup> )
Эвакуации (от- чуждения)	территория вокруг ЧАЭС в радиусе 30 км, с которой в 1986 г. было эвакуировано население			

Перечень населенных пунктов, находящихся в зонах радиоактивного загрязнения, пересматривается не реже одного раза в пять лет Советом Министров Республики Беларусь.

Площадь зоны проживания с периодическим радиационным контролем составляет около 100 тыс. км<sup>2</sup>, зоны проживания с правом на отселение – около 21 тыс. км<sup>2</sup>, зоны отчуждения, первоочередного и последующего отселения занимают примерно 10 тыс. км<sup>2</sup>, из которых 7 тыс. км<sup>2</sup> расположены на территории Беларуси, 2 тыс. км<sup>2</sup> – России, 1 тыс. км<sup>2</sup> – Украины.

На территории с периодическим радиационным контролем проживание и трудовая деятельность не ограничиваются, но люди имеют особый социально-экономический с льготами и доплатами.

При *проживании населения на загрязнённой радионуклидами территории* учитывается, что:

- любая доза радиации не является безопасной для человека и требует принятия мер по её снижению;
- существует возможность суммации повреждающего действия на организм излучения и вредного действия ксенобиотиков;
- необходим индивидуальный подход к условиям проживания в каждом населённом пункте из-за сложившейся различной радиэкологической обстановки и психоэмоционального состояния людей.

На загрязнённых в результате радиационной аварии территориях должны осуществляться:

- радиационный контроль основных видов облучения населения;
- снижение доз по всем основным видам облучения до оптимальных значений (если доза облучения населения превышает 1,0 мЗв/год);
- мероприятия, не приводящие к нарушению хозяйственного и социального функционирования (если доза облучения превышает 0,1 мЗв/год, но не более 1,0 мЗв/год).

Облучение работников организаций, осуществляющих деятельность на подвергшихся загрязнению территориях, не должно превышать 5 мЗв/год. В организациях, где облучение работников выше 1 мЗв/год по причине аварийного загрязнения, создают службы радиационной безопасности, задачами которых являются радиационный контроль (согласованный с органами госсаннадзора) и проведение мероприятий по снижению облучения работников.

Дозовые нагрузки на проживающих на загрязнённых радионуклидами территориях людей снижают мероприятиями, проводимыми государством на *национальном уровне* и населением *самостоятельно*.

**На национальном уровне** проводятся следующие мероприятия:

- радиационный контроль;
- рациональное ведение сельского хозяйства;
- технологическая переработка сельскохозяйственного сырья;
- применение обогащённых пищевых продуктов;
- проведение обучения и воспитания населения.

**Радиационный контроль** осуществляется за мощностью экспозиционной дозы, плотностью потока частиц, содержанием радионуклидов в воздухе, воде, почве.

**Рациональное ведение сельского хозяйства** включает:

- выбор вида и сорта сельскохозяйственных растений;
- 
- определение типа, pH и механического состава почвы;
- измерение концентрации в почве минеральных и органических веществ.

Для снижения содержания радионуклидов в сельскохозяйственной продукции осуществляют:

- подбор культур;
- обработку почвы;
- известкование кислых почв;
- внесение минеральных удобрений;
- ведение животноводства.

Доступным способом снижения поступления радионуклидов из почвы в растения является *переспециализация растениеводства*, включающая замену культур и сортов с высокими коэффициентами перехода радиоактивных веществ на минимально накапливающие. Переспециализация особенно эффективна в овощеводстве. Достаточно результативно *изменение структуры посевных площадей*. Активная сорбция радионуклидов частицами почвы снижает их поступление в растения. Для ее улучшения рекомендуется вносить в почву глинистые минералы. Так как кислая реакция способствует более легкому переходу радионуклидов из почвы в растения, *известкование* почв применяется для повышения pH. Известкование снижает содержание радионуклидов в овощах в 5-10, во фруктах и ягодах – в 4-5 раз. *Внесение удобрений* обогащает почву минеральными веществами, кроме того фосфорные удобрения связывают  $^{90}\text{Sr}$ , калийные –  $^{137}\text{Cs}$  и препятствует накоплению радионуклидов в растениях. Однако количество азотных удобрений увеличивать не рекомендуется, так как их повышенное содержание в почве ускорит накопление радионуклидов растениями.

*Ведение животноводства* на загрязненных территориях также имеет свою специфику. В организм сельскохозяйственных животных радиоактивные вещества поступают перорально в основном в составе кормов. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в мягких органах и тканях животных в 2-3 раза выше, чем в костной ткани,  $^{90}\text{Sr}$  накапливается в скелете. Концентрация обоих радионуклидов во внутреннем жире и сале примерно в 20-30 раз ниже, чем в мясе.

С целью уменьшения содержания радиоактивных веществ в производстве мясомолочных продуктов:

- получают чистые корма путем рационального ведения растениеводства;
- окультуривают пастбища;
- вводят в корма ферроционаты и другие цезий-связывающие вещества.
- применяют особые схемы выращивания молодняка и откорма крупного рогатого скота, в частности, если радиоактивность территории выше  $5 \text{ Ки/км}^2$ , то за 1,5-2 месяца до убоя выпас скота организуют на «чистых» территориях, а если таковых нет, то скот переводят на стойловое содержание и кормят чистыми кормами с добавлением «берлинской глазури» или других сорбирующих добавок.

**Технологическая переработка сельскохозяйственного сырья** включает:

- переработку загрязненного цельного молока на сливки и творог, сыр и сливочное масло, топленое масло со снижением радионуклидов в 4-6, 8-10, 90-100 раз соответственно;
- переработку загрязненного радионуклидами мяса на консервы, фарш, колбасы.

Для снижения вредного влияния радиации на население пищевая промышленность производит хлебобулочные и кондитерские изделия, безалкогольные напитки и другие продукты питания с **добавками**, в частности:

- вытяжками из растений, содержащими масляный раствор  $\beta$ -каротина, экстракт корня солодки;
- витаминами  $B_1$ ,  $B_2$ ;
- фруктовыми соками и мякотью, богатыми микроэлементами, витаминами и пектиновыми веществами.

**Обучение и воспитание населения** включает информирование о снижении дозы облучения и способам защиты от радиации в конкретных условиях проживания на радиационно загрязненных территориях. Особое внимание уделяют беременным женщинам и кормящим матерям, от образа жизни которых зависит уровень облучения ребенка.

В условиях проживания на загрязненных радионуклидами территориях население **самостоятельно**:

- применяет доступные физические и биологические способы радиационной защиты;
- ведет здоровый образ жизни;
- осуществляет самоконтроль за своим здоровьем.



## Медицинская профилактика лучевых поражений

Основным условием сохранения жизни и здоровья людей при воздействии ионизирующего излучения является предупреждение предельно дозового облучения. Это осуществляется, в первую очередь, проведением комплекса организационных, инженерно- и агротехнических мероприятий, направленных на защиту временем, расстоянием и экранами. Медико-профилактические, включая санитарно-гигиенические, мероприятия применяются при невозможности избежать сверхдозового облучения.

В плане *медицинской профилактики* врачи:

- проводят диспансеризацию;
- участвуют в радиологическом обучении и воспитании;
- оценивают риск радиационного фактора для здоровья;
- дают рекомендации по здоровому образу жизни с упором на рациональное питание и превентивному питанию;
- назначают радиопротекторы, радиомитигаторы, адаптогены;
- направляют граждан для оздоровления на санаторно-курортное лечение.

**Диспансеризация** проводится в соответствии с Инструкцией «О порядке организации диспансерного обследования граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС, других радиационных аварий», утвержденной Постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь 16.03.2010 № 28, которая определяет порядок диспансерного обследования населения, пострадавшего от ионизирующего облучения, и их несовершеннолетних детей.

**Цель** диспансеризации – оказание медицинской помощи и освидетельствования пострадавших.

Диспансерное обследование проводится в государственных и ведомственных организациях здравоохранения. Общее руководство диспансеризацией осуществляется Министерством здравоохранения Республики Беларусь через Республиканский научно-практический центр радиационной медицины и экологии человека на республиканском уровне, управлениями здравоохранения областных исполнительных комитетов – на областном уровне, главными врачами организаций здравоохранения – на районном уровне.

Диспансерное обследование включает:

- выявление и постановка на учет граждан;
- организацию и проведение медицинских осмотров, диагностических, лечебных и реабилитационных мероприятий;
- внесение сведений о гражданах в базу данных Государственного регистра лиц, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС, других радиационных аварий;
- экспертную оценку диспансерного обследования граждан.

Выявление и постановка на учет граждан осуществляется участковым врачом-терапевтом, участковым врачом-педиатром, врачом общей практики, участковой медицинской сестрой и другими врачами-специалистами при обращении граждан в организации здравоохранения и при посещении на дому.

Диспансерное обследование граждан организуется по **шести группам первичного учета**:

- первая – участники ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС;
- вторая – граждане, эвакуированные, отселенные, самостоятельно выехавшие с территории радиоактивного загрязнения из зоны эвакуации в 1986 году;
- третья – граждане, проживающие на территории радиоактивного загрязнения в зонах первоочередного отселения и зоны последующего отселения, включая детей, находившихся во внутриутробном состоянии, а также отселенные и самостоятельно выехавшие из этих зон;
- четвертая – дети, родившиеся от граждан 1-3-й групп первичного учета;
- пятая – граждане, проживающие или проживавшие в зоне с правом на отселение, в зоне с периодическим радиационным контролем;
- шестая – участники ликвидации последствий других радиационных аварий и их дети.

Согласно Инструкции выделяются также группы **повышенного радиационного риска**:

- группа А – граждане, первой и второй групп, находившиеся в пределах зоны эвакуации в 1986 г.;
- группа Б – граждане третьей и пятой групп 1968-1986 гг. рождения;

– группа В – граждане с неоднократным в течение 2 и более лет превышением дозы внутреннего облучения 1 мЗв/год.

Диспансерное обследование граждан осуществляется по определенной схеме в объеме согласно законодательству Республики Беларусь (таблица 4.14). При наличии медицинских показаний гражданам могут быть назначены дополнительные диагностические исследования и консультации других врачей-специалистов.

**Таблица 4.14** – Схема диспансерного обследования граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС, других радиационных аварий

Группа первичного учета	Возрастная категория	Обязательный объем диспансерного обследования	
		Медицинский осмотр врачами-специалистами	Диагностические исследования
1	от 18 лет	Врач-терапевт (врач общей практики), врач-эндокринолог	Общий клинический анализ крови, ЭКГ, УЗИ щитовидной железы
2	от 18 лет	Врач-терапевт (врач общей практики), врач-эндокринолог	Общий клинический анализ крови, УЗИ щитовидной железы
3	до 18 лет	Врач-педиатр (врач общей практики), врач-эндокринолог	Общий клинический анализ крови, УЗИ щитовидной железы, СИЧ-измерения
	от 18 лет	Врач-терапевт (врач общей практики), врач-эндокринолог	Общий клинический анализ крови, УЗИ щитовидной железы, СИЧ-измерения
4	до 18 лет	Врач-педиатр (врач общей практики)	Общий клинический анализ крови
	от 18 лет	Врач-терапевт (врач общей практики)	Общий клинический анализ крови
5	до 18 лет	Врач-педиатр (врач общей практики)	Общий клинический анализ крови, СИЧ-измерения
	от 18 лет	Врач-терапевт (врач общей практики), врач-эндокринолог	Общий клинический анализ крови, УЗИ щитовидной железы, СИЧ-измерения
6	от 18 лет	Врач-терапевт (врач общей практики)	Общий клинический анализ крови

После проведенного медицинского осмотра пациенту устанавливается заключительный диагноз и разрабатывается индивидуальный план реабилитации, включающий проведение лечебных и реабилитационных мероприятий.

Экспертная оценка диспансерного обследования граждан включает:

- проверку полноты и правильности установления заключительного диагноза;
- проверку правильности кодирования диагнозов в соответствии с МКБ-10;
- проверку наличия и полноты информации о проведенных лечебных и реабилитационных мероприятиях;
- проверку соответствия объема и периодичности диспансерного наблюдения граждан.

Для проведения диспансерного обследования граждан могут создаваться *выездные бригады* из врачей-специалистов и средних медицинских работников.

***Обучение и воспитание населения в области обеспечения радиационной безопасности*** проводится в рамках гигиенического обучения и воспитания, направленного на овладение знаниями, умениями и навыками в области гигиены, здорового образа жизни, охраны здоровья и осуществляемого для профилактики заболеваний и формирования здорового образа жизни.

Под ***радиологическим обучением и воспитанием*** понимают комплексную просветительную, обучающую и собственно воспитательную деятельность, направленную на формирование здоровья индивидов, социальных групп и общества в целом и бережное отношение к среде обитания в условиях действия радиационного фактора. Его осуществляют *устными, печатными, изобразительными и комбинированными методами*.

***Устная пропаганда*** позволяет напрямую контактировать с аудиторией с учетом ее специфики и воздействует на слуховой анализатор. К средствам устной пропаганды относятся лекции, беседы, вечера вопросов и ответов, викторины, конференции, инструктажи.

***Печатные методы*** направлены на массовый охват населения с помощью тиражированной литературы. В печатной пропаганде применяются книги, брошюры, журналы, статьи, листовки, памятки, газеты, рецепты, электронные информаторы.

***Метод изобразительной пропаганды*** является наглядным и воздействует на зрительный анализатор. Изобразительная пропаганда

проводится с помощью рисунков, таблиц, плакатов, планов, фотографий, муляжей, моделей, фантомов, скульптур, микро- и макропрепаратов.

**Комбинированная пропаганда** оказывает влияние на зрительный и слуховой анализаторы аудитории одновременно, позволяет воздействовать большое количество людей и является высоко эффективной. Комбинированная пропаганда включает кино, телевидение, видеопоказы, музеи, выставки, дни здоровья.

При проведении радиологического обучения и воспитания обращается внимание на физический, химический и биологический способы защиты, принципы радиационной защиты «количеством», «расстоянием», «временем» и «экранами». Большое значение в выработке привычек и навыков имеет обучение населения способам радиационной защиты на личном примере. Особую роль играет борьба со стрессовыми ситуациями и радиофобией, которые ухудшают последствия ионизирующего облучения. В этом случае привлекаются врачи-психиатры, используются методы психопрофилактики и психогигиены по сохранению и укреплению психического здоровья населения, живущего на радиоактивно загрязненных территориях.

Под *риском* понимается вероятность повреждения, болезни или смерти при определенных условиях, обусловленных воздействием вредных факторов среды обитания. С точки зрения радиационной медицины **риск** для здоровья – это *вероятность появления лучевых детерминированных и стохастических поражений у человека за определенный интервал времени*.

**Абсолютный риск** – это увеличение количества случаев лучевых поражений в определенной группе населения, не зависящее от действия других факторов.

**Целью** определения риска для здоровья является диагностирование случаев лучевых поражений при обращении населения за медицинской помощью или во время медицинских осмотров.

Для определения вероятности возникновения лучевых поражений проводится оценка риска. Для наиболее полной оценки вреда, который может быть нанесен здоровью в результате облучения в малых дозах, определяется ущерб, учитывающий эффекты облучения отдельных органов и тканей тела человека с различной радиочувствительностью и всего организма в целом.

В соответствии с линейной беспороговой теорией зависимости риска стохастических эффектов от дозы облучения величина риска

пропорциональна дозе облучения и связана с дозой через линейные коэффициенты радиационного риска.

Величина, используемая для определения границ доз облучения

персонала и населения, равна  $5,0 \times 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$  и называется обобщенный граничный риск. При работе с источниками ионизирующей радиации вводятся следующие границы доз облучения (в течение года):  $1,0 \times 10^{-3} \text{ Зв}^{-1}$  для персонала и  $5,0 \times 10^{-5} \text{ Зв}^{-1}$  для населения. Область оптимизации риска и область абсолютно приемлемого риска разделяются значением уровня пренебрежимо малого риска, равным  $10^{-6}$ . При обосновании защиты от источников потенциального облучения в течение года вводятся значения граничного риска для персонала –  $2,0 \times 10^{-4} \text{ год}^{-1}$ , для населения –  $1,0 \times 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ .

Уменьшение риска до возможно низкого уровня осуществляется с учетом того, что:

- граница риска устанавливается индивидуально для каждого источника ионизирующей радиации (так как предел риска регламентирует потенциальное облучение от всех возможных источников);

- снижение риска ниже минимального уровня нецелесообразно (так как ниже этого значения риск считается пренебрежимым).

Коэффициенты номинального риска (вероятности нанесения вреда здоровью при нормальном функционировании радиационно-опасного объекта) с учетом вреда рака и наследственных заболеваний приведены в таблице 4.15.

**Таблица 4.15** – Коэффициенты номинального риска с учетом вреда злокачественных новообразований и наследственных заболеваний

Облучаемая группа населения	Коэффициент риска злокачественных новообразований, $\times 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$	Коэффициент риска наследственных эффектов, $\times 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$	Сумма, $\times 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$
Все население	5,5	0,2	5,7
Персонал	4,1	0,1	4,2

С учетом уровня безопасности АЭС в режиме нормальной эксплуатации, когда фактические выбросы и сбросы создают по каждому пути воздействия дозу облучения населения менее  $10 \text{ мкЗв}$  в год, радиационный риск для населения составляет менее  $10^{-6}$  за год и является безусловно приемлемым.

Риск развития онкологических заболеваний со смертельным исходом у населения в районе размещения АЭС не должен превышать 0,1 % суммы рисков развития раков со смертельным исходом, возникающих в результате других причин.

Под **здоровым образом жизни** понимается осознанная необходимость постоянного выполнения правил и способов сохранения и укрепления здоровья, сочетающаяся с разумным отношением к окружающей среде. **Рациональное питание** – это физиологически полноценное питание здоровых людей, которое соответствует энергетическим, пластическим и биохимическим потребностям организма, обеспечивает гомеостаз и поддерживает функциональную активность органов и систем, сопротивляемость к воздействию неблагоприятных факторов окружающей среды на оптимальном уровне в различных условиях его жизнедеятельности. Рациональное питание должно быть адекватным, сбалансированным, безопасным и разнообразным.

**Превентивное питание**, рекомендуемое населению, направлено на:

- снижение поступления радионуклидов;
- снижение скорости всасывания радионуклидов в организме;
- ослабление вредного действия радионуклидов на клетки, ткани и органы;
- уменьшение депонирования и ускорения выведения радионуклидов из организма.

Для **снижения поступления радионуклидов** предусматривается ограничение или исключение потребления грибов, ягод, овощей и других продуктов:

- являющихся накопителями радионуклидов;
- загрязненных радионуклидами;
- загрязненных нитратами, свинцом, ртутью, кадмием, алюминием усиливающими действие радиации на организм человека;
- богатых жирами, которые являются основой для перекисного окисления липидов, участвуют в образовании радиотоксинов, служат проводниками в организм и накопителями гидрофобных ксенобиотиков.

Рекомендуется потребление экологически чистых продуктов, проверенных:

- Госсанэпиднадзором;
- Госсанветнадзором;
- Госинспекцией по качеству.

Все продовольствие, реализуемое предприятиями торговли и общественного питания, должно соответствовать требованиям качества и иметь сертификаты качества производителя, санитарно-эпидемиологическое заключение и сертификат соответствия на каждую партию продуктов.

**Снижению поступления радионуклидов** также способствует кулинарная и технологическая обработка пищевых продуктов. При производстве качественных продуктов особое внимание уделяется качеству сырья, технологиям обработки, а также планировке, отделке, оборудованию, санитарно-техническому благоустройству и содержанию помещений предприятий пищевой промышленности и общественного питания.

Технологическая переработка продовольственного сырья может снижать остаточные количества радионуклидов до РДУ. Так, при засолке и мариновании количество радионуклидов в получаемой продукции будет в два раза меньшим по сравнению с исходными свежими продуктами. При переработке молока радионуклиды переходят в молочные продукты обратно пропорционально их жирности. Их наименьшая концентрация регистрируется в сливочном масле, сливках, сырах, жирном твороге, сметане.

Количество радионуклидов, в частности, цезия-137, в мясе значительно снижается путем дезактивации. Так, промывка в проточной воде уменьшает радиоактивное загрязнение в 1,5-3 раза, вымачивание в 85 % растворе поваренной соли в течение 2 ч – в 3 раза. При четырехразовой засолке и вымачивании солонины со сменой рассола радиоактивность может быть уменьшена в 100 раз. При этом выход радионуклидов из мяса пропорционален степени измельчения мяса и времени его вымачивания.

Следует отметить, что из молодого мяса радиоактивные вещества уходят значительно быстрее, чем из старого.

Предпочтительным способом термической обработки продуктов, полученных на загрязненных территориях, является варка, при которой значительная часть радионуклидов переходит в бульон.

При проварке мяса в течение 10 мин в слегка кипящей воде при закрытой крышке и сливе отвара содержание радионуклидов умень-



шается примерно в 2 раза, а после варки в других порциях воды в течение 30-40 минут – в 3-6 раз.

Кости говядины, содержащие стронций-90, для приготовления бульонов использовать не рекомендуется.

После проварки мяса его можно подвергать тушению, жарке, запеканию или другому способу тепловой обработки. Однако первичные жарка, тушение, высушивание, копчение, вяление загрязненной продукции нецелесообразны, так как с испарением жидкости концентрация радионуклидов увеличивается.

Для дезактивации *овощей и фруктов* вначале производят механическую очистку их поверхности от земли и удаление наиболее загрязненных частей, затем промывку в теплой проточной воде. Более полная дезактивация овощей происходит после варки.

Дезактивация *воды для питья* осуществляется путем удаления радиоактивных частиц и растворенных радионуклидов. Для *очистки от радиоактивных частиц* проводится самопроизвольное оседание, вынужденное оседание, фильтрация, в том числе через сорбенты, *от растворенных радионуклидов* – фильтрация, выпаривание, ионообменная адсорбция, мембранные технологии.

Для *снижения всасывания и связывания радионуклидов в желудочно-кишечном тракте* применяют продукты, богатые пектинами, фитатами, антоцианами, пищевыми волокнами, лигнинами. Источниками поступления *пектинов* являются груша, свекла, черная смородина, морковь, яблоки, огурцы, мармелад, перец, зефир, тыква, соки с мякотью, крыжовник, клюква, черешня, *фитатов* – зерновые, бобовые. Много *антоцианов* содержат темноокрашенные плоды и ягоды (черноплодная рябина, слива, черная смородина, виноград, вишня), *пищевых волокон* – цельное зерно, овощи, орехи, семена, бобовые.

Для предотвращения внутреннего облучения радионуклидами цезия, стронция и плутония применяется *конкурентное замещение* их калием, рубидием, кальцием и железом потребляемых продуктов. Источниками *калия* являются курага, урюк, изюм, чернослив, чай, орехи, лимон, фасоль, картофель, пшеница, рожь, редька, овсяная крупа, яблоки, хурма, черешня, томаты, капуста, чеснок, морковь, черная смородина, свекла, абрикосы, молочные продукты, какао, пивные дрожжи. Содержат калий и продукты животного происхождения – свинина, икра, сливочное масло, а также продукты моря.

Много *рубидия* содержится в красном винограде, кальция – молоке и молочных продуктах, яйцах, бобовых, зеленом луке, укропе,

петрушке, репе, хрене, шпинате, *железа* – мясе, рыбе, зеленых овощах, ржаном хлебе, семенах подсолнечника, яблоках, изюме, салате, черноплодной рябине. Лучше усваивается железо животного происхождения.

***Для предотвращения действия радионуклидов на биологические молекулы:***

- исключаются из рациона продукты, богатые жирами (масло сливочное, сало) и прооксидантами (ревень, красная смородина);

- рекомендуются животные продукты, содержащие полноценный белок (мясо, рыба, птица).

- рекомендуется прием пищи, содержащей витамины (С, Е, А, бета-каротины) и минералы (йод, цинк, медь, селен, кобальт), с антиоксидантными свойствами, которые препятствуют перекисному окислению липидов.

Витамин *С* содержит шиповник, черная смородина, сладкий перец, черноплодная рябина, земляника, томаты, капуста, зеленый лук, витамин *Е* – облепиха, кукуруза, бобовые, нерафинированные растительные масла, гречка, семечки подсолнуха, семена злаковых, витамин *А* – говяжья печень, сливочное масло, яичный желток, *бета-каротины* – морковь, красный сладкий перец, абрикосы, брокколи, шпинат.

Основными источниками поступления *йода* являются морская капуста, морские продукты, рыба, фасоль, гречневая крупа, чеснок, свекла, черноплодная рябина, йодированная соль, *цинка* – кукуруза, грецкие орехи, овсяная крупа, рис, фасоль, семена подсолнечника и тыквы, цветная капуста, свекла, морковь, желток яйца, печень, говядина, сельдь, *меди* – свекла, картофель, яблоки, горох, фасоль, орехи, гречка, сыр, печень, рыба, мясо, *селена* – чеснок, рис, ячмень, овес, рыба, *кобальта* – щавель, груша, укроп, свекла, зеленый лук, черная смородина, рыба, морковь, орехи, горох, фасоль.

***Для ускорения выведения радионуклидов*** из организма рекомендуется:

- усиление перистальтики и регулярное опорожнение кишечника за счет включения в пищевой рацион продуктов, богатых пищевыми волокнами и клетчаткой (хлеб грубого помола, пшено, гречневая, перловая и овсяная крупы, капуста, свекла, чернослив, отвар семян льна, крапивы, ревеня);

- регулярный пассаж желчи и мочи дополнительным количеством жидкостей и настоев трав с мочегонным и желчегонным действием (настои белой ромашки, зверобоя, бессмертника, тысячелистника, мяты, шиповника, укропа, тмина, зеленого чая);

– стимуляция лимфатического дренажа лекарственными травами (овес обыкновенный, овсяные хлопья, листья черной смородины, подорожника, цветки календулы, кукурузные рыльца);

– потребление зеленых овощей, содержащих соли кальция и калия, которые способствуют выведению из организма цезия-137 и стронция-90.

*Выведению радионуклидов* также способствует:

– голодание;  
– периодическая очистка органов и систем от шлаков и токсинов, вместе с которыми выводятся радионуклиды.

Для **повышения адаптационно-компенсаторных возможностей организма** врачи назначают фитопрепараты из лекарственных растений, обладающих:

- *стимулирующим и адаптогенным* (женьшень, элеутерококк, аралия, родиола) действием;

- *кардиотропным* (боярышник, пустырник, зверобой) действием;

- *противолучевым* (облепиха, подорожник, ромашка аптечная, женьшень, золотой корень, заманиха, медуница лекарственная, одуванчик) действием;

- *противомикробным* (зверобой, ромашка, календула, шалфей, подорожник) действием.

Также используют фитопрепараты из шиповника, черной смородины, облепихи, рябины, черники, календулы, крапивы, содержащие *витамины, в том числе с антиоксидантными свойствами*.

Повышению адаптационно-компенсаторных возможностей организма способствуют лекарственные средства промышленного производства:

- настойка женьшеня;
- настойка элеутерококка;
- настойка заманихи и другие.

Также рекомендуется:

- психотерапия, психопрофилактика и психогигиена;  
- прием витаминominеральных и витаминoаминокислотных комплексов;

– гидро-, свето-, электро-, тепло-, грязе-, механо- и другие физиотерапевтические процедуры;

– прием профилактических продуктов, обогащенных пищевыми волокнами, витаминами, минеральными веществами, животным белком.

К *медицинским профилактическим средствам противорадиационной защиты*, назначаемым врачами, относятся:

- радиопротекторы;
- средства длительного поддержания повышенной радиорезистентности организма;
- средства предупреждения поражений от внутреннего облучения инкорпорированных радионуклидов.

**Радиопротекторы** – химические соединения, назначаемые для предупреждения или ослабления вредного влияния ионизирующих излучений на организм до облучения.

*Защитное действие радиопротекторов* реализуется в физико-химической и химической стадиях. Механизм действия радиопротекторов заключается в:

- инаktivировании свободных радикалов;
- донорстве электронов;
- адсорбции на клеточных макромолекулах и препятствии их повреждения;
- восстановлении поврежденных радиацией молекул;
- создании клеточной гипоксии;
- препятствии развитию кислородного эффекта;
- развитию биохимического шока;
- повышении в клетках содержания сульфгидрильных групп.

Наиболее важное их действие заключается в предупреждении разрушения и стимуляции процессов восстановления ДНК.

*Показателями эффективности радиопротекторов* являются:

- ✓ коэффициент защиты – процент выживших облученных животных при введении радиопротектора;
- ✓ фактор изменения дозы – увеличение среднесмертельной дозы СД<sub>50</sub> облученных животных при введении радиопротектора;
- ✓ скорость развития противолучевого эффекта – время между введением радиопротектора и развитием радиорезистентности;
- ✓ продолжительность радиозащитного действия – время до развития лучевого поражения.

Радиопротектор как средство профилактики должен:

- при остром облучении в дозах 1-10 Гр иметь фактор изменения дозы не менее 1,2;
- быть нетоксичным, не иметь побочных эффектов;
- иметь продолжительность эффекта 2-8 ч при пероральном приеме;
- защищать от разных видов ионизирующих излучений;

- не снижать резистентность организма к другим вредным воздействиям внешней и внутренней среды;
- быть стабильным, не терять своих защитных свойств в течение 3 месяцев;
- иметь низкую стоимость, быть доступным.

Радиопротекторы классифицируют по:

- химической структуре;
- тропности к органам и тканям;
- механизму действия;
- скорости развития эффекта;
- длительности защитного эффекта (таблица 4.16).

К наиболее эффективным радиопротекторам относят *цистамин*, *индралин*, *мексамин*, *амифостин*, *нафтизин*.

**Цистамин** принимается внутрь за 30-60 мин до гамма- и рентгеновского облучения, продолжительность защитного действия 4-6 ч, **индралин** – per os за 10-15 мин до облучения, продолжительность защитного действия 30-60 мин, **мексамин** – per os за 5-15 мин до облучения, продолжительность защитного действия 60 мин, **амифостин** – внутривенно за 30 минут до облучения, продолжительность защитного действия 1 сутки, **нафтизин** – внутримышечно за 3-5 мин до облучения, продолжительность защитного действия 1,5-2 ч.

**Таблица 4.16**– Классификация радиопротекторов

Признак	Группа	Представители
Химическая структура	- сероазотсодержащие - биогенные амины - другие соединения	цистамин, мексамин, амифостин; индралин, нафтизин, препарат С; цианиды, нитриты, депрессанты
Механизм действия	- конкурентное - рецепторное - нерецепторное гипоксическое	цистамин; индралин; цианиды, нитриты.
Длительность эффекта	- кратковременное - длительное	цистамин, индралин; индометарен, диэтилстильбестрол

К *средствам предупреждения поражений от внутреннего облучения инкорпорированными радионуклидами* относятся:

- средства, предупреждающие поступление радионуклидов через кожу и слизистые;

- средства, предупреждающие депонирование радионуклидов в критических органах;
- средства, ускоряющие элиминацию радионуклидов из организма.

***Средства, предупреждающие поступление радионуклидов через кожу и слизистые***, включают мыла, синтетические моющие средства, ионообменные смолы, натрия гидрокарбонат, физиологический раствор.

К *предупреждающим депонирование радионуклидов* в критических органах относятся средства, предотвращающие накопление радиоактивного йода в щитовидной железе – калия йодид, настойка йода, раствор Люголя, радиоактивного цезия и рубидия в желудочно-кишечном тракте, мышцах и других органах – ферроцин, радиоактивного стронция и бария в костях – полисурьмин, адсорбар, фосфалюгель.

К наиболее эффективным средствам, *ускоряющим элиминацию* из организма радиоактивного *плутония* и продуктов деления *урана* относятся пентацин, тримефацин, *полония* – унитиол, оксатиол, *цезия* – калия оротат, ферроцин, *стронция* – кальция хлорид, кальция глюконат, аммония хлорид, бария сульфат, алюминия фосфат.

К ***средствам длительного поддержания повышенной радиорезистентности организма*** относятся средства защиты от:

- вызывающих детерминированные эффекты доз ионизирующего излучения;
- от субклинических доз ионизирующего излучения.

*Средства защиты от вызывающих детерминированные эффекты доз ионизирующего излучения* включают гормональные средства стероидной структуры и их аналоги (диэтилстильбэстрол, индометарфен) и иммуномодуляторы (вакцины, цитокины, пептиды, нуклеотиды, ингибиторы простагландинов, продукты метаболизма микроорганизмов и другие).

К *средствам защиты от субклинических доз ионизирующего излучения* относятся корректоры тканевого метаболизма (предшественники нуклеиновых кислот, компоненты антиоксидантной защиты, витамины, минералы, аминокислоты), фитоадаптогены (экстракт элеутерококка, настойка женьшеня), зооадаптогены (продукты пчеловодства, продукты гидробионтов).

Радиопротекторным действием обладают также некоторые *антибиотики*, увеличивающие сопротивляемость организма к бактериям и восстанавливающие пептидные связи, а также *фенольные соеди-*

нения полимерной структуры, в частности меланин. Радиопротекторные свойства отмечены у ряда **радиомитигаторов** – химических соединений, которые при введении в организм в ранние сроки после облучения до наступления клинических признаков лучевого поражения снижают повреждающее действие ионизирующих излучений на клетки критических систем организма, в первую очередь, кроветворной и иммунной систем. Эффективны в первое время после облучения и до облучения средства профилактики и купирования первичной реакции на облучение – противорвотные (латран, церукал) и противодиарейные (метацин, лоперамид), средства ранней патогенетической терапии (иммуномодуляторы, стимуляторы регенерации, плазмозаменители).

К радиомитигаторам относят и указанные выше *средства длительного поддержания повышенной радиорезистентности организма*, применяемые до облучения и показывающие защитный эффект после облучения.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Правовое регулирование и обеспечение радиационной безопасности.
2. Надзор и контроль за обеспечением радиационной безопасности. Радиационный мониторинг.
3. Радиационная безопасность в условиях планируемого облучения.
4. Радиационная безопасность в ситуации аварийного облучения.
5. Радиационная безопасность в условиях существующего облучения.
6. Медицинская профилактика лучевых поражений.





## ГЛАВА 3

# ПАТОГЕНЕЗ ЛУЧЕВЫХ ПОРАЖЕНИЙ. ЛУЧЕВАЯ БОЛЕЗНЬ

### Стадии развития лучевых поражений

Ионизирующие излучения вызывают развитие лучевых поражений в *короткие первичные, или добиологические, стадии, включающие физическую, физико-химическую и химическую, и длинную вторичную, или биологическую, стадию.*

Отличительной особенностью влияния ионизирующих излучений на человека является *дистанционность* воздействия, то есть способность проникать в организм, ионизировать атомы и молекулы и вызывать поражения путем физических взаимодействий и химических реакций.

Для биологического действия ионизирующих излучений характерно:

- наличие продолжительного скрытого (латентного) периода;
- развитие поражений под влиянием малых доз;
- появление патологии у последующих поколений.

Большое значение в развитии радиационных поражений имеют:

- возраст;
- физиологическое состояние;
- интенсивность обменных процессов облученных лиц;
- мощность, ритм и характер облучения (однократное, многократное, кратковременное, пролонгированное, хроническое, непрерывное, прерывистое (фракционированное), внешнее, внутреннее, общее, локальное);
- физические особенности излучения (рентгеновские и  $\gamma$ -лучи,  $\alpha$ - и  $\beta$ -частицы, протоны и нейтроны);
- ионизирующая и проникающая способность излучений.

На физической, физико-химической и химической стадиях патогенеза изменения происходят в течение до 1 миллисекунды на молекулярном уровне, на биологической стадии, продолжающейся годами, – на клеточном, тканевом, органном и организменном уровнях.

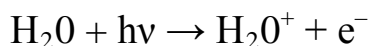
Начальная **физическая** стадия длится примерно  $10^{-16}$ - $10^{-15}$  секунды и практически не зависит от условий среды. В течение этого времени ионизирующие излучения передают свою энергию облучае-

мой среде и приводят к образованию ионизированных атомов и молекул, а при недостатке энергии – к их возбуждению.

Прямо ионизирующее  $\alpha$ -излучение возбуждает и ионизирует атомы и молекулы вещества путем неупругих столкновений, а  $\beta$ - и протонное излучения – путем упругих и неупругих взаимодействий с орбитальными электронами.

Косвенно ионизирующее  $\gamma$ -излучение при фото- и Комптон-эффекте выбивает электрон из поля атома или взаимодействует с ядром с образованием пары электрон-позитрон. Тормозное рентгеновское излучение действует аналогично. Нейтронное излучение возбуждает ядра атомов путем упругого или неупругого рассеивания и радиационного захвата, которые приходят в движение или излучают  $\gamma$ -кванты, протоны,  $\alpha$ -частицы. Вследствие этого происходит дальнейшая ионизация других атомов и молекул облучаемой среды.

Так, излучение выбивает электрон из молекулы воды с образованием иона:



В случаях, когда энергии для ионизации атомов или молекул недостаточно, образуется возбужденная молекула воды:



Ионизирующие излучения также выбивают прямо или косвенно электрон из молекул ДНК, белков, липидов, углеводов.

На **физико-химической** стадии, длительность которой составляет примерно  $10^{-14}$ - $10^{-11}$  секунды, происходит:

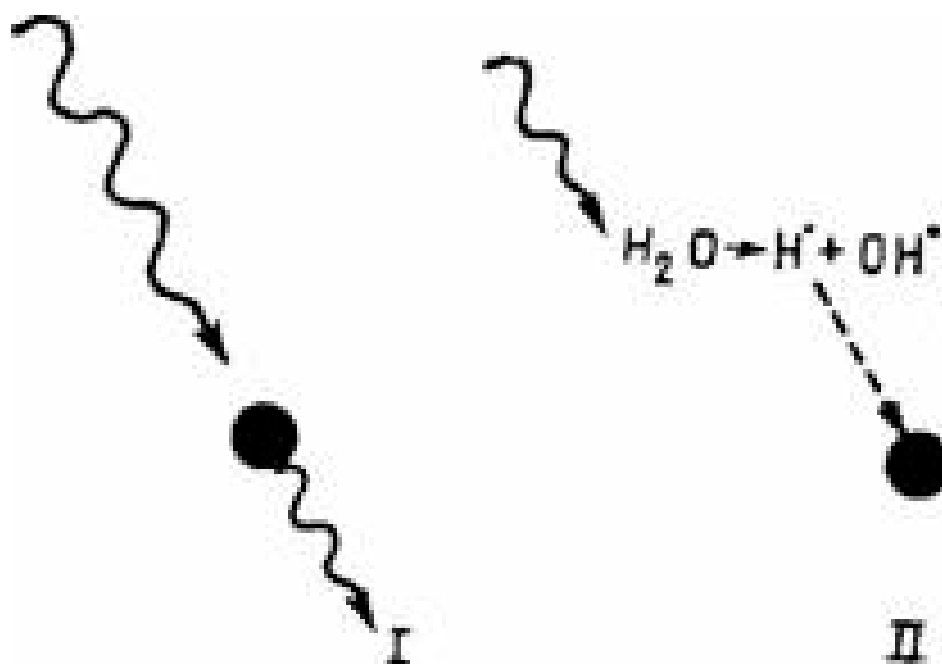
- перераспределение поглощенной энергии внутри молекул и между ними;
- образование новых ионов, гидратированных электронов, возбужденных молекул, свободных радикалов.

Свободные радикалы – это реакционно способные электрически нейтральные атомы и молекулы, имеющие на внешней орбитали неспаренный электрон. Время их существования значительно превышает срок существования возникших при поглощении энергии ионизирующего излучения ионов. Свободные радикалы, отдающие электроны, являются *восстановителями*, а принимающие электроны – *окислителями*.

Первичные радиационно-химические изменения, происходящие на физико-химической стадии, базируются на:

- **прямом** (непосредственном) повреждающем действии – когда изменения в макромолекуле происходят непосредственно при взаимодействии с ионизирующим излучением;

- **косвенном** повреждающем действии – когда макромолекула повреждается продуктами радиолиза (рисунок 3.1).

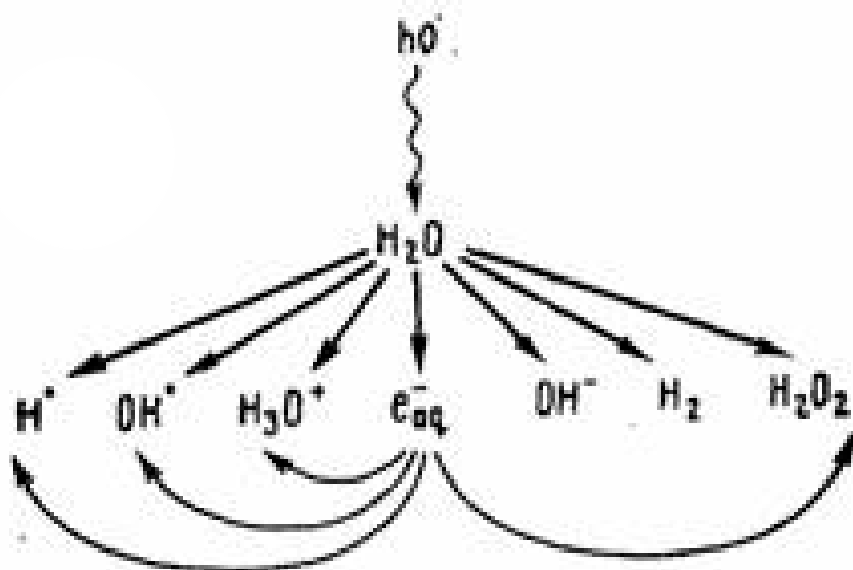


**Рисунок 3.1.** Прямое (I) и косвенное (II) действия ионизирующего излучения на клетку (черным кружком обозначена мишень, волнистой стрелкой – излучение, пунктирной стрелкой – диффузия свободных радикалов к молекуле-мишени)

Под **радиолизом** понимают цепь радиационно-химических превращений, приводящих в итоге к образованию свободных радикалов. Живая материя на 70-90 % состоит из воды, водой поглощается около 75 % энергии излучения, в результате чего образуются многочисленные продукты радиолиза воды, воздействующие на биомолекулы (рисунок 3.2).

Выбитый на физической стадии **радиолиза воды** электрон захватывается молекулой воды, образуя молекулу воды с отрицательным зарядом ( $\text{H}_2\text{O}^-$ ), либо окружается четырьмя молекулами воды с образованием гидратированного электрона ( $\text{e}^-_{\text{гидр}}$ ).

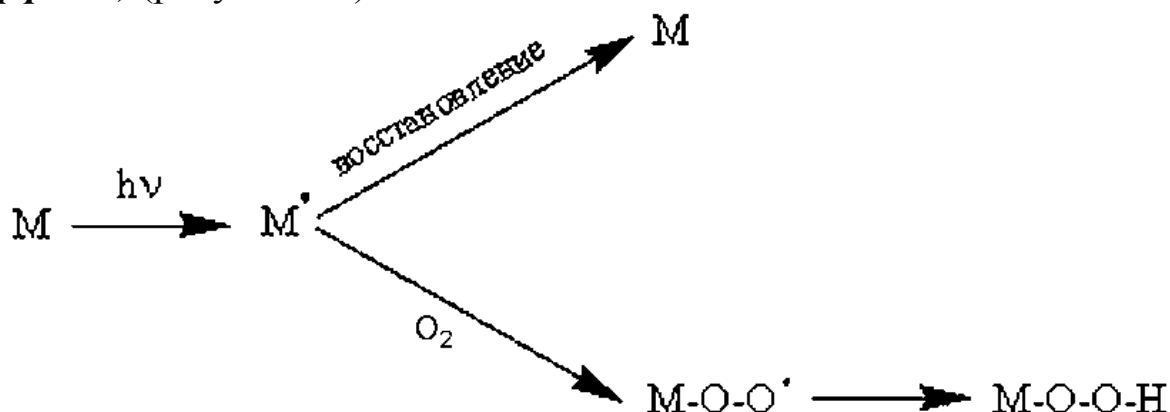
Гидратированный электрон в конце пробега теряет свою кинетическую энергию и захватывается расположенными рядом молекулами воды, которые в дальнейшем располагаются вокруг него.



**Рисунок 3.2.** Продукты радиолитического распада воды (тонкими стрелками показаны возможные реакции гидратированного электрона)

В итоге первичного радиолитического распада воды образуется одинаковое количество положительных и отрицательных ионов, являющихся окислителями или восстановителями.

Радиолитический распад воды в присутствии кислорода приводит к росту числа радикалов, обуславливающих усиление повреждающего действия ионизирующего излучения и препятствующих репарации (**кислородный эффект**) (рисунок 3.3).



**Рисунок 3.3.** Схема механизма кислородного эффекта

Радиационное повреждение биомолекул возрастает также в присутствии ионов с переходной валентностью ( $Fe^{+2}$ ,  $Cu^+$ ,  $Zn^{2+}$  и др.). Ки-

слородный эффект объясняется тем, что кислород и ионы с переходной валентностью смещают равновесие реакций в сторону окислителей. Восстановительный радикал водорода  $\text{H}^\bullet$  и гидратированный электрон  $e^-_{\text{гидр}}$  взаимодействуя с кислородом образуют окислители  $\text{O}_2^{\bullet-}$  и  $\text{HO}_2^\bullet$ . В результате дальнейших физико-химических превращений образуются активный атомарный кислород и синглетный кислород.

Непосредственное влияние ионизирующего излучения приводит к миграции вырванного электрона по цепи **нуклеиновых кислот** до участка с повышенными электрон-донорными свойствами (Т, Ц) и образования на этом участке свободных радикалов. Первичные изменения в молекуле **белка** при выбивании из нее электрона распределяются случайно, далее происходит внутримолекулярная миграция электронов, энергия концентрируется в более уязвимых участках с высокими электрон-донорными свойствами в боковых цепях аминокислот, где образуются свободные радикалы.

**Углеводы** достаточно устойчивы к действию ионизирующего излучения. Высвобождение электронов и образование свободных радикалов происходит под воздействием высоких доз ионизирующего излучения.

Облучение **липидов** приводит к образованию свободных радикалов наиболее чувствительных фосфолипидов, из которых при взаимодействии с кислородом синтезируются гидропероксиды. Гидропероксиды в присутствии металлов с переменной валентностью распадаются до высоко активных радикалов, индуцирующих пероксидное окисление липидов (ПОЛ). Взаимодействие радикалов между собой обуславливает появление стабильных соединений, что приводит к обрыву цепной реакции.

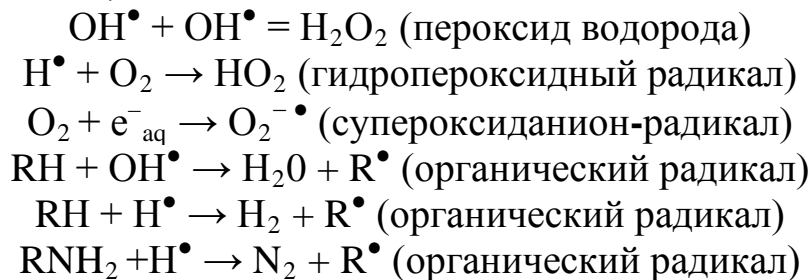
Токсичность продуктов пероксидного окисления ненасыщенных жирных кислот (пероксиды, оксиды, эпоксиды, альдегиды, кетоны), а также продуктов окисления фенолов (хиноны и семихиноны) для мембран проявляется в нарушении их жизненно важных функций. Первичные (липидные) радиотоксины способны вызывать разрывы ДНК, хромосомные аберрации, подавлять репарацию.

В результате опосредованного действия продуктов радиолиза воды также образуются свободные радикалы **белков, углеводов, липидов** и **нуклеиновых кислот**.

Продолжительность **химической** стадии составляет примерно  $10^{-6}$ - $10^{-3}$  секунды. На этой стадии свободные радикалы реагируют между собой и с интактными молекулами, вследствие чего повреждают-

ся биологически важные макромолекулы нуклеиновых кислот, липидов, белков и углеводов, образуется широкий спектр молекул с измененной структурой и функциональными свойствами.

Свободные радикалы и электроны, образовавшиеся в процессе радиолиза воды, на химической стадии приводят к образованию водорода пероксида, молекулярного водорода, пероксидных и органических радикалов, являющихся окислителями:



Свободные радикалы способны приводить к разрыву у **белков** водородных, гидрофобных, дисульфидных связей, образованию сшивок и агрегатов, отщеплению аммиака и сероводорода в полипептидной цепи аминокислот. В присутствии кислорода модификация аминокислот свободными радикалами происходит более активно, разрываются пептидные связи, образуются новые ковалентные связи, что приводит к изменению конформационной и химической структуры белковой молекулы. Радиационно-химические трансформации вторичной, третичной и четвертичной структуры белков обуславливают изменение их биологических свойств и, в результате, приводят к нарушению ферментативной, гормональной, рецепторной и других жизненно важных функций.

Свободные радикалы повреждают **углеводы**, вызывая деполимеризацию, окисление полисахаридов и распад углеводородной цепи. Продукт радиолиза углеводов – метилглиоксаль – ингибирует синтез ДНК и белка, а также подавляет деление клеток. При дозе облучения около 10 Гр снижается вязкость гиалуроновой кислоты, а при больших дозах – изменяется ее структура в результате отщепления гексозамина и гексуроновых кислот. Окислительный распад, укорочение цепи и отщепление альдегидов от простых сахаров наблюдаются при дозах порядка 1000 Гр.

Наиболее биологически значимые повреждения, появляющиеся под воздействием свободных радикалов, отмечаются у **дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК)**. К ним относятся модификация или удаление некоторых азотистых оснований, разрыв фосфоэфирных и водородных связей, распад дезоксирибозы, повреждение ДНК-мембранного комплекса, нарушение связей ДНК-белок, сшивок ДНК-

ДНК и ДНК-белок, образование тиминовых димеров, одно- и двунитевых разрывов. Дисбаланс между активностью нуклеаз и полимераз, недостаток макроэргов, распад ядерной мембраны и пострадиационный апоптоз клеток с фрагментацией ДНК обуславливает усиление катаболизма и деградацию хроматина. Присутствие кислорода увеличивает число повреждений оснований ДНК в 3 раза, число одно- и двунитевых разрывов – в 2-2,5 раза.

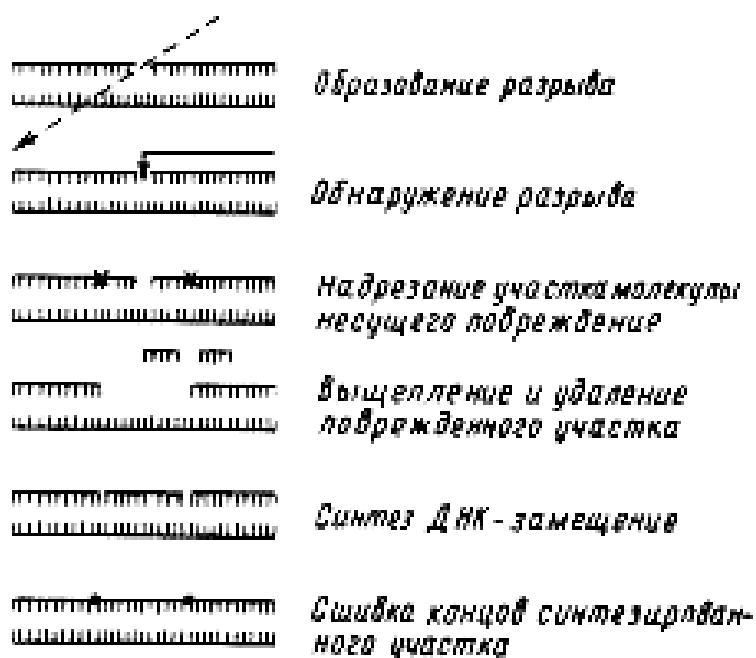
Поглощенная доза 1 Гр приводит к образованию в клетках 10-100 двунитевых разрывов, 1000 одиночных разрывов, 5000 поврежденных азотистых оснований. Возможны хромосомные aberrации в виде концевых делеций, фрагментации хромосом, образования кольцевых хромосом, дицентриков, хромосомных мостов, а также внутривхромосомных и межхромосомных транслокаций.

Под воздействием ионизирующего излучения в *рибонуклеиновой кислоте (РНК)* происходят аналогичные радиационно-химические изменения, за исключением двунитевых разрывов в связи с ее одонитчатой структурой.

**Пострадиационное восстановление** ДНК начинается сразу после облучения и протекает в фазы *быстрого и медленного восстановления*. Быстрое восстановление происходит в течение первого часа после облучения, медленное восстановление длится еще 6-8 часов. Ионизирующие излучения в течение 20 минут могут вызвать нестойкие повреждения хромосом, восстанавливающиеся в течение 6 часов.

Одонитевые разрывы ДНК восстанавливаются легче, так как в данном случае нет повреждения комплементарной нити и она удерживается возле нити, поврежденной водородными связями (рисунок 3.4). При этом поврежденные фрагменты нити ДНК вырезаются (эксцизия) и заменяются новыми. Если репарация одонитевых разрывов ДНК происходит неполноценно, при повторном облучении вероятность перевода одонитевых разрывов их в двунитевые возрастает. Накопившиеся в клетках сублетальные повреждения ДНК переходят в летальные.

При восстановлении двунитевых разрывов вероятность ошибок больше. Около 10 % двунитевых разрывов не восстанавливается и образуются хромосомные aberrации в виде концевых делеций и фрагментации хромосом, кольцевых хромосом, внутривхромосомных и межхромосомных транслокаций, дицентриков, хромосомных мостов.



**Рисунок 3.4.** Схема механизма репарации одиночного разрыва

Наиболее важной системой восстановления в облученной клетке является система ферментативной репарации, в которой участвуют нуклеозидазы, ДНК-инсертазы, лиазы, эндонуклеазы, экзонуклеазы, ДНК-лигазы, ДНК-полимеразы и другие ферменты.

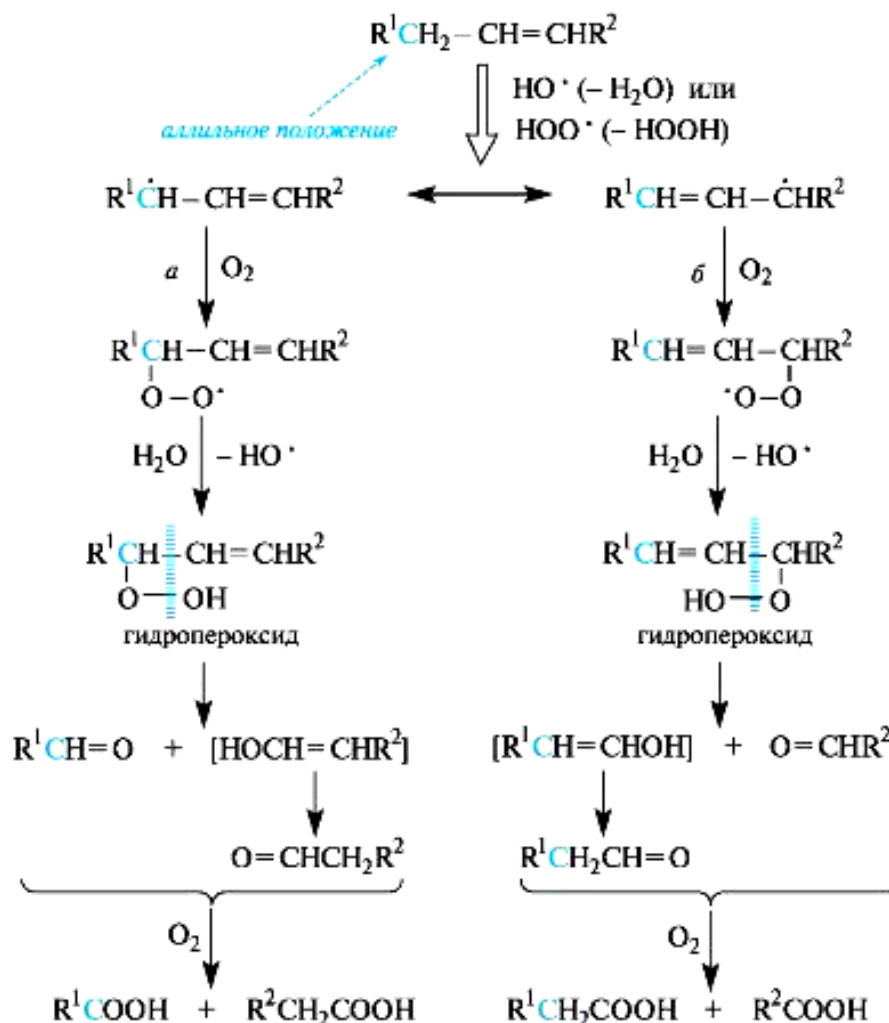
Нуклеозидазы отщепляют поврежденные пуриновые и пиримидиновые основания с образованием апуриновых и апиримидиновых участков АП-сайты, ДНК-инсертазы встраивают новые основания в АП-сайты, лиазы расщепляют тиминовые димеры, эндонуклеазы разрезают ДНК (инцизия), экзонуклеазы удаляют поврежденный участок ДНК (эксцизия), ДНК-лигазы сшивают нуклеотиды, а ДНК-полимеразы полимеризуют нуклеотиды-трифосфаты, размещенные в необходимом порядке при участии неповрежденной комплементарной цепи.

Тем не менее, избыточная активность ферментов, восстанавливающих разрывы ДНК, иногда может усугублять повреждения генома клетки. Также в процессе репарации ДНК в геном клетки могут внедряться новые или активироваться имеющиеся онкогены, что приводит к трансформации здоровых клеток в раковые (малигнизации) после облучения.

Пероксидное окисление **липидов** обуславливает изменение их свойств и нарушение биохимических процессов в клетке (рисунок 3.5). Пероксиды изменяют химический состав, вязкость, проницаемость, электрокинетический потенциал липидов, нарушают их рецеп-



цию. В результате изменяется проницаемость мембран, транспорт ионов через мембраны, активация мембраносвязанных ферментов, снижается накопление и передача энергии, образуются радикалы фосфолипидов, которые разрывают молекулы по месту эфирной связи. Нарушаются жизненно необходимые функции мембран (барьерная, рецепторно-сигнальная, регуляторно-ферментативная, транспортная и другие), что может привести клетку к гибели.



**Рисунок 3.5.** Модель пероксидного окисления липидов

**Биологическая** стадия продолжается от нескольких часов или недель до нескольких лет, может протекать в течение всей жизни подвергшегося облучению человека, а иногда и его потомков. На биологической стадии формируются повреждения на клеточном, тканевом, органном и организменном уровнях, отдаленные последствия облучения, развиваются процессы биологического усиления первич-

ного радиационного поражения и репарации.

*Биологическое усиление* проявляется в повышении выраженности молекулярных повреждений в клетке по причине нарушения метаболизма (нуклеинового обмена, белкового обмена, окислительного фосфорилирования). При этом в крови и моче увеличивается количество нуклеотидов и продуктов их распада – азотистых оснований, нуклеозидов, мочевой кислоты. Повреждение мембран лизосом и выход за их пределы протеаз усиливают процессы протеолиза. Развивается отрицательный азотистый баланс.

**Репарация** подразделяется на:

- прямую;
- эксцизионную;
- пострепликативную.

В *прямой* репарации, протекающей в одну стадию, задействованы специфические ферменты, быстро устраняющие соответствующие повреждения и восстанавливающие исходную структуру нуклеотидов. Например, Об-метилгуанин-ДНК-метилтрансфераза снимает метильную группу с азотистого основания на один из собственных остатков цистеина. Наиболее распространенная *эксцизионная* репарация включает удаление из ДНК поврежденных азотистых оснований с последующим восстановлением нормальной структуры молекулы. В данном случае ферментативная система удаляет короткую одонитевую последовательность двунитевой ДНК с ошибочно спаренными или поврежденными основаниями и замещает ее путем синтеза комплементарной оставшейся нити. Этот тип репарации основан на расщеплении гликозилазами N-гликозидных связей модифицированных оснований с сахарофосфатным каркасом молекулы ДНК.

*Пострепликативная* репарация имеет место в тех случаях, когда в процессе эксцизионной репарации образуются одноцепочечные бреши. Они заполняются в процессе гомологичной рекомбинации при помощи белка RecA. В случае преобладания процессов биологического усиления над процессами восстановления, повреждения на различных уровнях усиливаются, повышается риск возникновения отдаленных последствий облучения.

## **Лучевые поражения клеток, тканей, органов и систем организма**

Уровень повреждения клеток, тканей, органов и организма в целом зависит от их радиочувствительности. *Радиочувствительность*,

или **радиопоражаемость**, – это восприимчивость биологических объектов к действию ионизирующих излучений, которая определяет степень их повреждения. Измеряют радиочувствительность с помощью поглощенной дозы, вызывающей гибель 50 % облученных организмов за определенное время после воздействия ионизирующего излучения (ЛД<sub>50</sub>).

Радиочувствительность объектов к ионизирующим облучениям обуславливает выраженность лучевых поражений. Самыми радиочувствительными являются млекопитающие. Для человека ЛД<sub>50</sub> составляет 3-5 Гр, птиц – 8-20 Гр, пресмыкающихся – 80-200 Гр, растений – 10-1500 Гр, бактерий – 1000-3000 Гр.

Клетки и ткани организма также отличаются по своей радиочувствительности. **Радиочувствительность клеток** зависит от организации генома, состояния системы репарации ДНК, интенсивности окислительно-восстановительных процессов, содержания антиоксидантов, активности ферментов, нейтрализующих продукты радиолиза воды, пролиферативной активности. Наиболее радиочувствительны активно делящиеся клетки, что объясняется повреждением структур ядерной ДНК и хромосомными абберациями в митозе.

Результатом действия ионизирующего излучения могут быть:

- **нелетальные** повреждения (функциональные и метаболические нарушения, формирование нелетальных мутаций, радиационного блока митозов), при которых клетки остаются жизнеспособны;
- **летальные** повреждения (репродуктивная или интерфазная гибель клеток).

К **функциональным** пострадиационным нарушениям относятся:

- ✓ уменьшение фагоцитарной активности нейтрофилов;
- ✓ снижение активности ферментов клеток;
- ✓ нарушение функциональной активности нервных клеток;
- ✓ другие изменения в клетках.

Ионизирующие излучения могут приводить к **нелетальным** генным мутациям с нарушением структуры ДНК. В соматических клетках такие мутации приводят к нарушениям процессов клеточного деления в виде:

- уменьшения пролиферации;
- постоянного деления со злокачественным перерождением. В зародышевых клетках нелетальные генные мутации приводят к генетическим порокам у потомства.

**Радиационный блок митозов** происходит сразу после облучения в делящихся клетках в форме временной остановки митотической

активности. Продолжается он в течение суток, причем, чем выше доза ионизирующего излучения, тем длительней задержка деления. На 1 Гр поглощенной дозы в среднем происходит задержка митоза на 1 час. При остановке митотической активности в клетке интенсивно идут процессы восстановления лучевых повреждений. В активно пролиферирующих клетках костного мозга задержка деления является одной из причин его опустошения.

Если во время блока митозов репарация постлучевых повреждений не произошла, клетка гибнет, причем с повышением поглощенной дозы число погибающих клеток возрастает.

Различают *репродуктивную* (митотическую и постмитотическую) гибель клетки, происходящую во время деления клеток, и *интерфазную* гибель клетки, не зависимую от фаз клеточного цикла и наблюдаемую как в делящихся, так и в неделящихся клетках.

Репродуктивная гибель клетки происходит из-за повреждения ядерной ДНК и хромосомных aberrаций, приводящих к неравномерному распределению генетического материала между дочерними клетками, образованию гигантских клеток с полиплоидными ядрами.

Причиной интерфазной гибели являются повреждения внутриклеточных мембран, нарушения клеточного метаболизма, деградация ядерного хроматина. Различают интерфазную гибель лимфоцитов, тимоцитов, ооцитов и других неделящихся клеток или клеток с ограниченной способностью к делению после облучения дозами до 1 Гр, интерфазную гибель неделящихся (нейроны, миоциты) или редкоделящихся (гепатоциты) клеток после облучения в дозах 10-100 Гр и интерфазную гибель делящихся клеток до вступления в митоз после облучения высокими дозами.

Развивается интерфазная гибель клеток в виде некроза (пассивная гибель) или апоптоза (генетически опосредуемая гибель). Перед *некрозом* в клетках затухают метаболические процессы, теряется способность сохранять ионный гомеостаз. При *апоптозе* гибель облученных клеток сопровождается деградацией ДНК. Апоптоз характерен для клеток лимфоидной и кроветворной тканей.

Чем выше доза облучения, тем выше вероятность возникновения необратимых изменений, приводящих к гибели клетки, ее малигнизации, нарушению пролиферативной активности, ограничению способности к дифференцированию, снижению функциональных возможностей. Низкие дозы повреждают клетку в меньшей степени,

более вероятно ее восстановление, сохранение жизнеспособности и основных функций.

**Радиочувствительность тканей** подчиняется правилу Бергонье-Трибондо: *радиочувствительность ткани прямо пропорциональна пролиферативной активности и обратно пропорциональна степени дифференцировки составляющих ее клеток.*

Лучевое поражение тканей, органов и всего организма происходит по причине нарушения пролиферации, повреждения и гибели клеток. Более радиочувствительны ткани, состоящие из активно размножающихся малодифференцированных клеток (кроветворная ткань, гонады, эпителий слизистых оболочек). Радиорезистентными (обладающими самой низкой радиочувствительностью) являются высокоспециализированные мало обновляющиеся ткани (мышечная, костная, нервная). Исключением из правила Бергонье-Трибондо являются лимфоциты – высокоспециализированные клетки с высокой радиочувствительностью (погибают при облучении 1-3 Гр), которая обусловлена угнетением биосинтеза белков, предотвращающих их генетически контролируемую гибель.

**Радиочувствительность органов и систем организма** зависит от радиочувствительности составляющих данный орган тканей и их функциональной активности. Активно функционирующие органы более радиочувствительны по сравнению с органами с низкой функциональной активностью.

Наиболее чувствительны к ионизирующему излучению в **семенниках** мужчин сперматогонии, в которых постоянно происходит размножение, более радиорезистентны – зрелые клетки (сперматозоиды и сперматоциты).

Клеточное опустошение семенников происходит при дозах облучения свыше 0,15 Гр. Дозы от 0,15 до 2 Гр обуславливают временную олигоспермию. Дозы в диапазоне 2,5-3,5 Гр вызывают временную (до года) стерильность. При облучении в дозах 3,5-6 Гр возникает постоянная стерильность. Частичное восстановление сперматогенеза возможно ко второму году после облучения.

В **яичниках** взрослой женщины самыми радиочувствительными являются ооциты в фазе митоза. Воздействие однократного облучения на оба яичника в дозе 1-2 Гр приводит к временному бесплодию и прекращению менструаций на 1-3 года. При облучении в диапазоне доз 2,5-6 Гр развивается стойкое бесплодие.

**Легкие** взрослого человека характеризуется средней радиочувствительностью, поскольку обладают низкой пролиферативной ак-

тивностью. При локальном облучении легких может развиваться радиационный пневмонит с воспалением дыхательных путей и легочных альвеол, потерей эпителиальных клеток, приводящий к фиброзу.

**Почки** относительно радиорезистентны, однако при облучении в дозах более 30 Гр в течение 5 недель может развиваться хронический нефрит.

**Орган зрения** обладает средней степенью радиочувствительности. При дозах 2,5-8 Гр возможны воспалительные процессы в конъюнктиве и склере, а также катаракта.

У взрослых **кости и сухожилия** радиорезистентны, при заживлении переломов их радиочувствительность увеличивается. Максимальная радиочувствительность **костной системы** отмечается на 38 - 85 сутки внутриутробного развития, а также у растущих детей.

**Мышцы** являются высокорезистентными.

Наибольшей радиочувствительностью в **пищеварительной** системе обладает слизистая тонкого кишечника. Менее радиочувствительны слизистые полости рта, языка, слюнных желез, пищевода, желудка, прямой и ободочной кишок. Самая низкая радиочувствительность у паренхимы поджелудочной железы и печени.

**Центральная нервная система** является радиорезистентной, для **эндокринной системы** характерна относительная радиорезистентность. Дозы свыше 100 Гр обуславливают гибель нейронов.

**Сердце** считается радиорезистентным органом, однако при локальном облучении в дозах 5-10 Гр можно обнаружить изменения миокарда, 20 Гр – поражение эндокарда. В **сосудах** радиочувствительны эндотелиоциты и содержащая большое количество коллагена адвентиция (наружный слой сосудистой стенки).

Ионизирующая радиация действует на все органы и ткани, но первостепенным для организма при определенной дозе облучения является поражение одного (или нескольких) **критических** органов или систем. Критическими считаются жизненно значимые органы и системы, которые в данном диапазоне доз повреждаются первыми и обуславливают клиническую картину и исход лучевого поражения. Наиболее важными критическими системами организма являются **системы кроветворения, желудочно-кишечного тракта и центральной нервной системы**. Их необратимое поражение приводит к формированию соответственно **костно-мозгового, желудочно-кишечного и церебрального синдромов** лучевой патологии, которые вызывают гибель организма в определенные сроки после облучения.

**Костно-мозговой, или кроветворный, синдром** развивается при облучении в диапазоне доз 1-10 Гр. Критический орган (система) – красный костный мозг, система кроветворения. Средняя продолжительность жизни составляет 30-40 суток. Ведущим поражением является нарушения гемопоэза. Костно-мозговой синдром обусловлен повреждением стволовых клеток красного костного мозга, приводящим к снижению количества кровяных клеток. Сокращение числа клеток периферической крови приводит к уменьшению количества крови, кровотечениям, инфекциям и другим симптомам, предшествующим гибели организма. Сокращение числа эритроцитов и снижение уровня гемоглобина в крови вызывает анемию. Уменьшение числа тромбоцитов приводит к возникновению кровотечений, усиливающих анемию, а числа лейкоцитов – к снижению резистентности организма и инфекционным осложнениям.

**Желудочно-кишечный синдром** развивается при поглощенной дозе 10-80 Гр и происходит на фоне костномозгового синдрома. Критический орган (система) – желудочно-кишечный тракт. Средняя продолжительность жизни составляет 7-8 суток. Ведущим поражением является повреждение энтероцитов, выстилающих внутреннюю стенку тонкой кишки. Нарушение процесса обновления быстроделющихся клеток у основания ворсинок и приводит к желудочно-кишечному синдрому, сопровождающемуся болями в желудочно-кишечном тракте, потерей аппетита, тошнотой, рвотой, диареей, изъязвлением слизистой рта и зева, вялостью, инертностью. Повреждение энтероцитов приводит к проникновению в брюшную полость из кишечника кишечной флоры и токсических продуктов распада. В результате развивается токсемия, бактериемия, перитонит, сепсис, дегидратация.

**Церебральный синдром** развивается при поглощенной дозе 80 - 100 Гр. Критический орган (система) – центральная нервная система. Средняя продолжительность жизни составляет 2 и менее суток. Ведущим поражением являются необратимые изменения в центральной нервной системе. Поскольку клетки центральной нервной системы радиорезистентны, воздействие ионизирующих излучений приводит к функциональным нарушениям на тканевом уровне. При непосредственном облучении нарушается гемо- и ликвородинамика головного мозга, развивается дисфункция и последующая гибель нейронов. Головные боли, апатия, сонливость, временная потеря сознания, судороги и другие симптомы церебрального синдрома связаны с повреждением головного мозга. Может развиваться терминальный отек мозга,

приводящий к смерти.

Необходимо подчеркнуть, что для организма человека характерен клеточный гомеостаз, то есть состояние строго сбалансированного самообновления жизненно важных систем на клеточном уровне. Старые отмершие клетки кроветворной, пищеварительной, дыхательной, сердечно-сосудистой и других систем постоянно заменяются на новые. Большая скорость обновления клеток характерна для критических кроветворной и пищеварительной систем, поражения которых приводят к развитию костно-мозгового и желудочно-кишечного радиационных синдромов, определяющих выживание или гибель облученного организма.

### **Лучевые поражения организма человека в эмбриональный и постэмбриональный периоды**

*Эмбрион* со 2-й по 8-ю недели и *плод* с 9-й недели до рождения, имеющие малодифференцированные ткани, высоко радиочувствительны. Внутриутробное облучение может привести к эмбриональной, неонатальной и постнатальной гибели, цитогенетическим, тератогенным, мутагенным, сомато-стохастическим эффектам. После рождения у детей, подвергшихся в пренатальный период воздействию ионизирующего излучения, отмечаются:

- ✓ снижение адаптационных возможностей организма;
- ✓ повышение общесоматической заболеваемости;
- ✓ нарушения гомеостаза;
- ✓ нарушения физического и умственного развития;
- ✓ онкологические заболевания;
- ✓ врожденные пороки развития.

Внутриутробное облучение на первой стадии эмбрионального периода до имплантации бластоцисты в слизистую оболочку матки (предимплантационный или герминальный период) вызывает самопроизвольный аборт.

Во избежание пренатального облучения на ранних, нераспознанных стадиях беременности плановые рентгенодиагностические исследования у женщин детородного возраста рекомендуется проводить в первые 10 суток после начала менструации («правило 10 дней»).

Среди врожденных пороков развития чаще всего встречаются дефекты костной и центральной нервной системы, органа зрения, а именно нарушения строения и формы черепа (рисунок 3.6), полидак-



тилия, анэнцефалия (рисунок 3.7), микроцефалия (рисунок 3.8), гидроцефалия (рисунок 3.9), микроофтальмия (рисунок 3.10), анофтальмия (рисунок 3.11).



**Рисунок 3.6.** Задняя черепно-мозговая грыжа



**Рисунок 3.7.** Анэнцефалия



**Рисунок 3.8. Микроцефалия**

Кроме того, у пренатально облученных детей отмечены врожденные пороки развития сердца и крупных сосудов, урогенитальной системы, грудная, паховая и пупочная грыжи.



**Рисунок 3.9. Гидроцефалия**

*Врожденные пороки развития* наблюдаются в основном при облучении на 9-60 дни после оплодотворения. В этот период даже невысокие поглощенные дозы (около 10 0,1 Гр) могут обусловить анэнцефалию, микроцефалию, гидроцефалию.



**Рисунок 3.10.** Микроофтальмия



**Рисунок 3.11.** Анофтальмия

Прямое влияние ионизирующего излучения приводит к *нарушению функций центральной нервной системы* в результате гибели во время митоза глиальных или нейронных клеток-предшественников, постмитотических незрелых нейронов, мигрирующих нейронов-

поводырей. Высокие дозы 1,8-5,5 Гр поражают красный костный мозг и снижают эритропоэз, тем самым нарушая транспорт кислорода к головному мозгу плода.

Задержка умственного развития детей может быть обусловлена внутриутробным облучением 1,5 Гр и выше на 8-26 неделях, особенно высока вероятность нарушений – на 16-24 неделях гестации.

К *нарушениям роста и физического развития* относятся недостаточные масса и размеры тела, масса внутренних органов (особенно селезенки и головного мозга).

Отдаленные эффекты ионизирующего облучения в пренатальном периоде проявляются в виде:

- ✓ онкологической патологии;
- ✓ роста иммунодефицитных состояний и других дисфункций иммунной системы, приводящих к снижению адаптационных возможностей организма;
- ✓ нарушения лимфопоэза;
- ✓ снижения йодпоглотительной и гормонсинтезирующей функций щитовидной железы;
- ✓ нарушения течения беременности.

***Радиочувствительность взрослого человека*** определяют:

- особенности облучения (*тип радиации, размер полученной дозы, продолжительность воздействия*);
- индивидуальные особенности человека (*генотип, возраст, пол, физиологическое и патофизиологическое состояние, радиочувствительность тканей, органов и систем облученной части тела*).

Каждый в отдельности и в сочетании друг с другом эти факторы обуславливают местный или общий *тип лучевых реакций, специфику, время появления и их значимость для организма*.

Повреждения могут вызвать любые виды ионизирующего излучения, основное различие заключается в количестве энергии, определяющей проникающую способность частиц и фотонов. Возможность возникновения повреждений прямо зависит от дозы облучения, а тяжесть лучевого поражения – от продолжительности. Если доза получена в течение нескольких дней или недели, эффекты будут менее сильными, чем при облучении в течение нескольких минут такой же дозой.

У 10-12 % людей отмечается повышенная индивидуальная радиочувствительность, связанная с наследственно сниженной способностью к репарации разрывов ДНК. На силу радиоповреждений влияют режим сна, степень утомления, беременность, наличие забо-

леваний, ожогов. Мужчины более радиочувствительны, чем женщины. С возрастом человек становится менее чувствительным к ионизирующим излучениям по причине торможения процессов деления и обновления клеток.

Под действием радиации возникают детерминированные и стохастические эффекты.

Для детерминированных ранних биологических последствий облучения характерен определенный *порог* дозы ионизирующего излучения, ниже которого изменения не возможны. Для стохастических поздних эффектов порог дозы ионизирующего излучения отсутствует и онкологические и генетические последствия могут возникнуть при самой малой дозе.

К **детерминированным последствиям облучения** относят *острую и хроническую лучевую болезнь*, а также *локальные (местные) лучевые повреждения*.

*Острая лучевая болезнь* возникает в результате мгновенного или более длительного (несколько часов, суток) воздействия общего равномерного облучения при поглощенной дозе выше 1 Гр. Тяжесть ее течения зависит от величины поглощенной дозы. Длительное действие ионизирующего излучения в низких, но превышающих предельно допустимые уровни, дозах, при накоплении суммарной эффективной дозы 2-6 Зв вызывает *хроническую лучевую болезнь*.

При неравномерном облучении тела человека развивается *локальная (местная) лучевая патология*. Она встречается в результате поражений при радиационных авариях, профессиональной деятельности рентгенологов и радиологов, а также рентгено-, радиодиагностики и лучевой терапии пациентов. *Локальная лучевая патология* у онкологических пациентов занимает одно из первых мест среди осложнений лучевой терапии.

Локальная лучевая патология включает:

- *ожоги кожи и подлежащих тканей* (поглощенная доза более 8-10 Гр);
- *проктиты, сигмоидиты, энтериты, колиты* (поглощенная доза более 3 Гр);
- *циститы, катаракту* (медленно развивающуюся при дозах 2,5-3 Гр у части облученных и быстро развивающуюся при дозах 7-8 Гр у всех пострадавших);
- *непродолжительную неполную стерильность* (поглощенная доза до 2,5 Гр);

- стойкое бесплодие у мужчин и женщин (поглощенная доза 2,5-6 Гр);

- *гипотиреоз, аутоиммунный тиреоидит, интерстициальную пневмонию, пневмонит, перикардит* (поглощенная доза более 15-20 Гр);

- *нарушения в системе кроветворения* (поглощенная доза более 8-10 Гр);

- *остеосклероз, реже остеопороз* (поглощенная доза 50-120 Гр).

Вероятность развития **стохастических последствий** прямо пропорциональна коллективной эффективной дозе радиации. В зависимости от вида клеток, в которых происходят наследственные изменения, различают сомато-стохастические эффекты у облученных лиц, и генетические эффекты у потомков облученных.

К сомато-стохастическим последствиям облучения относят онкологические заболевания крови, щитовидной железы, легких, желудка, молочной железы, яичников, кожи. Развитие радиационно-индуцированной онкопатологии характеризуется длительным латентным периодом (для развития лейкозов – 3-5 лет, рака щитовидной железы – 4-12 лет, рака легких, молочной железы, толстой кишки – 10-20 лет).

К **генетическим последствиям** облучения относят изменение морфологических и биохимических признаков, функциональные нарушения, снижение резистентности, нестабильность генома, повышение риска канцерогенеза, дестабилизацию генетического аппарата, а также снижение фертильности, рождение детей с врожденными пороками и задержкой развития у потомства облученных людей.

Дозы, при которых выявляется обратная реакция объекта по сравнению с реакцией, вызываемой поражающими дозами, называют малыми. Для человека диапазон малых доз составляет 0,04-0,05 Гр при однократном облучении. Можно отметить следующие типы зависимости лучевых эффектов от малых доз:

- вероятность поражения прямо пропорциональна дозе облучения;

- повышение дозы при малых дозах облучения приводит к поражению быстрее, чем при больших;

- повышение дозы при малых дозах облучения приводит к поражению медленнее, чем при больших.

Малые дозы облучения, граничащие с природным фоном, могут выступать стрессовым фактором, запускающим адаптационные процессы. Известно, что действие сверхмалых доз радиации индуцирует

восстановление ДНК, стимулирует иммунитет, процессы регенерации тканей. Этот эффект получил название *радиационного гормезиса*. Радиационный гормезис нашел применение в профилактике онкологических заболеваний, развивающихся при действии ионизирующего излучения. Длительное использование малых доз радиации адаптирует человека к большим дозам, обуславливая устойчивость организма к облучению. Также явление радиационного гормезиса используется при лечении некоторых заболеваний человека радоновыми ваннами.

### Пути воздействия ионизирующих излучений на человека

Лучевые поражения человека возникают в результате *внешнего, внутреннего, сочетанного и комбинированного* воздействия ионизирующих излучений (рисунок 3.12).



**Рисунок 3.12.** Пути воздействия ионизирующих излучений на человека

**Внешнее** облучение  $\gamma$ -лучами является последствием влияния:

- радиоактивного облака (при ядерных взрывах, авариях на АЭС);
- осевших на земную поверхность и объекты окружающей среды  $\gamma$ -излучающих радионуклидов;
- поднятой ветром в воздух радиоактивной пыли.

Загрязнение радионуклидами одежды и аппликация их на коже и слизистых оболочках обуславливает *внешнее контактное*  $\gamma$ - и  $\beta$ -облучение.

Различают *внешнее общее* (тотальное) и *местное* (локальное) облучения  $\gamma$ - и рентгеновскими лучами, нейтронами и  $\beta$ -частицами. Рентгеновское,  $\gamma$ - и нейтронное излучения повреждают все ткани, находящиеся на пути луча,  $\beta$ -излучение – только кожу и слизистые,  $\alpha$ -частицы – эпидермис кожи и эпителий слизистых. При удалении  $\beta$ - и  $\alpha$ -частиц с кожи и одежды или после перемещения на расстояние, превышающее поле действия источников излучения их влияние на организм прекращается.

Внешнее общее облучение может быть:

- однократным, или острым, (облучение один раз в 4 суток) и многократным (облучение два и более раза с перерывами более 4 суток);
- равномерным (поглощенная доза на разные органы практически одинакова) и неравномерным (поглощенная доза на разные органы отличается более чем на 10-15 %);
- кратковременным (импульсное воздействие  $\gamma$  - и нейтронного излучения ядерного взрыва), пролонгированным (непрерывное облучение в промежутки времени от нескольких часов до нескольких месяцев), длительным (непрерывное облучение в течение нескольких месяцев или лет), фракционированным (облучение с перерывами более суток).

В зависимости от продолжительности действия ионизирующего излучения различают острые (при кратковременном облучении), подострые (при пролонгированном облучении) и хронические (при длительном облучении) лучевые поражения. Однократное облучение в больших дозах возможно при ядерном взрыве, взрыве реактора АЭС, нахождении на радиоактивной местности.

**Внутреннее** облучение, обуславливающее лучевые поражения, может быть вызвано инкорпорированными радионуклидами, поступившими в организм:

- ✓ пероральным (через рот);
- ✓ ингаляционным (через легкие);
- ✓ перкутанным (через неповрежденную кожу);
- ✓ раневым (через поврежденную кожу или рану) путями.

Поступившие радионуклиды распределяются в организме равномерно, в основном в скелете, ретикулоэндотелиальной ткани, или



депонируются избирательно в отдельных органах. Почти сразу после поступления в организм начинается выведение радионуклидов через:

- ✓ почки (с мочой);
- ✓ кишечник (с калом, желчью, желудочным и кишечным соками);
- ✓ легкие (с выдыхаемым воздухом);
- ✓ железы (с потом, материнским молоком).

Поступление радионуклидов внутрь возможно при попадании в организм продуктов ядерного взрыва, аварийных выбросов ядерных объектов, вследствие несоблюдения правил техники безопасности при работе с источниками радиации и норм радиационной безопасности при профессиональном контакте с радиоактивными веществами, по пищевым цепочкам.

*Ингаляционное поступление радионуклидов* в организм человека при ядерных взрывах и авариях происходит кратковременно из радиоактивного облака и непрерывно за счет ветрового подъема пыли. При ветровой эрозии почвы мельчайшие аэрозольные частички оседают очень медленно и поэтому переносятся с воздухом на большие расстояния, обуславливая повторное загрязнение приземного слоя атмосферы радионуклидами. Такое явление наиболее опасно для постоянно проживающего и работающего на загрязненной территории населения.

*Попадание радионуклидов в организм по пищевым цепочкам* обусловлено наличием легких песчаных, подзолистых, торфяно-болотных почв с низкой поглощающей способностью, малым содержанием гумуса и вторичных глинистых минералов, в частности, в Полесье. В таких почвах радионуклиды цезия-137 и стронция-90 очень подвижны, коэффициент перехода их в растения высокий и в местных продуктах питания отмечались высокие уровни накопления радионуклидов и высокие дозовые нагрузки на проживающее население.

В результате равномерного или относительно равномерного общего однократного внешнего облучения всего организма или большей его части развивается типичная острая лучевая болезнь. При этом радиационному воздействию все системы, органы, ткани и клетки подвергаются одновременно и в одинаковой дозе.

В случае неравномерного внешнего облучения развиваются местные лучевые поражения кожи и слизистых.

*Сочетанные радиационные поражения* развиваются в результате одновременного или последовательного воздействия внешнего и внутреннего облучения.

*Комбинированные радиационные поражения* возникают при одновременном или последовательном воздействии на организм ионизирующих излучений и факторов нелучевой этиологии.

### **Характеристика острой и хронической лучевой болезни.**

Кратковременное облучение всего организма или большей его части высокими дозами ионизирующего излучения определяет **лучевую болезнь**, характеризующуюся совокупностью поражений органов и тканей, наличием нескольких периодов в течении и полисиндромными клиническими проявлениями.

В зависимости от равномерности облучения выделяют:

- лучевую болезнь, вызванную равномерным общим внешним влиянием излучения или радионуклидами с равномерным распределением в организме;
- лучевую болезнь, обусловленную внешним местным облучением или избирательно накапливающимися и поражающими «критические» органы радионуклидами;
- переходную форму, вызванную резко неравномерным общим облучением, сочетающую клинические проявления предыдущих форм.

Относительно равномерное общее облучение в зависимости от продолжительности влияния ионизирующего излучения определяет **острую или хроническую лучевую болезнь**.

**Острая лучевая болезнь (ОЛБ)** – это повреждения органов и тканей, возникающие после кратковременного (мгновенного или в течение часов-суток) внешнего или внутреннего облучения в дозе более 1 Гр. Для нее характерны клинические синдромы заболевания, переходные формы или их сочетания.

Большое значение в патогенезе ОЛБ имеет повреждение *критических органов* или *систем*, приводящее к появлению определенных синдромов лучевого поражения и обуславливающее выживаемость организма или его гибель спустя определенное время после облучения.

В зависимости от полученной дозы облучения в клинике ОЛБ преобладают проявления костномозгового, кишечного или церебрального синдромов. В соответствии с этим выделяют **типичную форму** ОЛБ, а также **острейшие (молниеносные) формы**:

- ✓ кишечную (10-20 Гр);
- ✓ токсемическую (сосудистую) (20-50 Гр);

✓ церебральную (более 50 Гр).

Для **типичной формы** характерно поражение кроветворных органов, а также в зависимости от степени тяжести прогноз для жизни от абсолютно благоприятного до неблагоприятного, смертность от 0 до 95 % и летальный исход через 11-60 суток.

Клинику и исходы при **кишечной форме** обуславливают процессы в эпителии тонкого кишечника, вызывающие поражение желудочно-кишечного тракта. Прогноз для жизни абсолютно неблагоприятный, смертность составляет 100 %, смерть наступает на 8-16 сутки при явлениях тяжелого энтерита.

**Сосудистая форма** характеризуется повреждением паренхиматозных органов и развивающейся вследствие этого токсемией, абсолютно неблагоприятным прогнозом для жизни, 100 % летальностью, гибелью на 4-7 сутки после облучения на фоне явлений энцефалопатической комы.

Основным при **церебральной форме** является поражение центральной нервной системы, прогноз для жизни абсолютно неблагоприятный, смертность – 100 %, смерть наступает на 1-3 сутки, ее причиной является первичное поражение нервной системы на фоне выраженной церебральной и менингеальной симптоматики.

Если облучение резко неравномерно, одновременно могут проявляться поражения других критических систем. Например, при  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучении в дозах более 10-15 Гр одной из критических систем, влияющих на течение ОЛБ, может стать кожа.

Однократное общее облучение от 1 до 10 Гр определяет **типичную** или **костномозговую (гемопозитическую)** форму ОЛБ.

Костномозговая форма ОЛБ развивается по периодам:

- начальный или первичной реакции на облучение;
- латентный (скрытый) или мнимого клинического благополучия;
- разгара болезни или выраженных клинических проявлений;
- восстановления;
- исходов и отдаленных последствий.

Выделяют *легкую* (I) при облучении в дозах от 1 до 2 Гр, *средней тяжести* (II) при облучении в дозах от 2 до 4 Гр, *тяжелую* (III) при облучении в дозах 4 до 6 Гр и *крайне тяжелую* (IV) при облучении в дозах от 6 до 10 Гр *степени ОЛБ*, а также *костномозговой, геморрагический, инфекционный, орофарингеальный, кишечный, токсемический и церебральный синдромы*.

При *костномозговом синдроме* первыми поражаются кроветворные органы. Самыми радиочувствительными считаются стволовые кроветворные клетки и лимфоциты. Вследствие нарушения функции кроветворения развивается дефицит клеток крови, который приводит к тромбоцитопении. Снижение количества тромбоцитов и изменение их функциональных свойств, а также нарушения состояния стенки сосудов, свертывающей и противосвертывающей систем обуславливает геморрагии. Для геморрагического синдрома характерна повышенная кровоточивость десен, носовые, кишечные, желудочные маточные и др. кровотечения, кровоизлияния в слизистые оболочки, кожу, паренхиму внутренних органов.

Уменьшение уровня нейтрофильных гранулоцитов приводит к снижению антимикробной резистентности при повреждении иммунных механизмов, что способствует развитию инфекционных осложнений. Источником инфекционных осложнений является собственная, вегетирующая в просвете желудочно-кишечного тракта, в дыхательных путях, на коже и слизистых оболочках, микрофлора.

Недостаточность системы кроветворения может не проявляться клинически в течение скрытого периода или периода мнимого клинического благополучия (так как зрелые клетки крови относительно радиорезистентны и сохраняют свои функции). На 2-3-и сутки вследствие интерфазной гибели в костном мозге, лимфоузлах и периферической крови снижается количество лимфоцитов. Продолжительность жизни радиорезистентных зрелых форм гранулоцитов и тромбоцитов составляет 7-10 дней, эритроцитов – 100-120 дней.

Изменения в периферической крови протекают в несколько этапов:

- ✓ реактивный нейтрофильный лейкоцитоз со сдвигом влево;
- ✓ первое опустошение периферической крови;
- ✓ абортный подъем (пролиферация клеток-предшественников гемопоэза);
- ✓ второе опустошение периферической крови (после истощения пролиферативного потенциала указанных клеток);
- ✓ окончательное восстановление (при восстановлении пролиферативного потенциала нелетально пораженных кроветворных клеток, достаточным является сохранение 0,1 % стволовых клеток).

По изменениям в периферической крови можно определить степень тяжести ОЛБ (таблица 3.1).

В ротовой полости более радиочувствительны слизистые мягкого неба и небных дужек. Поражение слизистой оболочки ротоносог-

лотки при **орофарингеальном синдроме** проявляется **мукозитом** с отеком и десквамацией слизистой щек и языка, рыхлостью десен, болезненностью, эритемой, некрозом тканей, а также нарушением вкуса (дисгевзией) и слюноотделения (ксеростомией). При облучении гортани развивается **ларингит** различной степени тяжести.

**Таблица 3.1** - Критерии степени тяжести ОЛБ в период разгара

Степень	Изменения в периферической крови, $\times 10^9/\text{л}$			Начало агранулоцитоза, сутки
	тромбоциты	лейкоциты	лимфоциты	
I	100-60	3,0-1,5	1	нет
II	50-30	1,5-0,5	0,5-1	20-30
III	30	0,5-0,1	0,3	8-20
IV	20	<0,5	0,1	6-8

Симптомы и течение мукозита зависят от дозы облучения. При первой степени тяжести ОЛБ мукозит развивается на 3-9-е, разгар заболевания отмечается на 10-15-е, а восстановление происходит на 20-25-е сутки после облучения. Гиперемия слизистой при второй степени тяжести ОЛБ наблюдается через 6 ч после облучения, процесс восстановления длится до 1-1,5 месяцев.

Для третьей степени тяжести ОЛБ характерны кровоточивость, изъязвление и некроз слизистой внутренней поверхности щек, мягкого неба, миндалин и подъязычной области на 8-12 сутки после облучения.

Облучение в дозах выше 10 Гр обуславливает крайне тяжелую ОЛБ четвертой степени без латентного периода. Эритема, отек, сильная боль появляются сразу, через 4-5 дней развивается некроз слизистой рта. Агранулоцитоз может привести к инфекционным осложнениям. Восстановление длится 1,5-2 месяца. Лимфоидная ткань рта и глотки восстанавливается спустя несколько месяцев.

Лучевое поражение слизистой пищевода проявляется мукозитом различной степени тяжести с гиперемией, отеком, эпителиитом, а также болями при прохождении пищи и чувством жжения.

Поражение кишечника при ОЛБ I-III степени тяжести не сопровождается серьезными клиническими проявлениями. Облучение в дозе 3-5 Гр вызывает на 3-й неделе симптомы **энтерита**: вздутие живота, кашицеобразный стул, тенезмы, повышенную температуру тела. С

повышением дозы облучения клинические признаки поражения кишечника нарастают.

При IV степени тяжести ОЛБ наблюдается гипо- и дегидратация организма, обусловленная диареей, потерей жидкости и электролитов, нарушением барьерной функции кишечника. На фоне быстроразвивающегося агранулоцитоза может возникнуть опасное осложнение – некротическая энтеропатия.

Лучевое поражение слизистой мочевого пузыря характеризуется развитием цистита.

Общее облучение в дозах 10-20 Гр обуславливает развитие спустя 6-8 суток **кишечного синдрома**. Облучение приводит к гибели стволовых и других делящихся клеток, созревающие и функциональные клетки вследствие относительной радиорезистентности продвигаются к верхушкам ворсинок (крипт) и слущиваются. Вследствие этого эпителий слизистой тонкого кишечника быстро исчезает, ворсинки уплощаются.

В клинической картине выделяют отсутствие латентного периода, резкое ухудшение общего состояния, повышение температуры до 39-40°C, тошноту, рвоту, боли в эпигастрии, головные, мышечные и суставные боли, задержку стула сначала и последующую диарею, снижение артериального давления. Параллельно развиваются тяжелые проявления орофарингеального синдрома, агранулоцитоз. Появления геморрагий в слизистой оболочке кишечника и инфекционных осложнений отягощает состояние пораженных людей. Смерть наступает уже через 8-16 суток при явлениях энтерита, пареза и непроходимости кишечника, нарушении водно-электролитного обмена и нарастании сердечно-сосудистой недостаточности.

Доза облучения более 20 Гр приводит к **токсемическому (сосудистому) синдрому** с поражением мембран клеток и утратой функций гистогематических барьеров. В кровоток поступают перекисные соединения, тканевые белки, олигопептиды, гистамин, серотонин, катехоламины, простаноиды, тромбоксан, кинины. Нарушение внутримозговой гемодинамики и ликвородинамики и токсемия обуславливают вторичное поражение ЦНС.

Первичная реакция проявляется изнурительной многократной рвотой через 10-20 мин после облучения, тяжелым коллапсом без потери сознания. Латентный период отсутствует. Появляются сильная слабость, интенсивная головная боль, тошнота, рвота, головокружение, тахикардия, патологические неврологические рефлексy, мышечная слабость, атаксия, температура повышается до 39°C.

На 4-5 день развивается токсическая энцефалопатия. Появляются заторможенность, угнетение рефлексов, менингеальный синдром, остановка дыхания на фоне отека мозга, легких, острой сердечно-сосудистой недостаточности и кома. Терминальной стадии могут предшествовать нарушения психики в виде неадекватного поведения и эйфории. Смерть наступает в течение 4-7 суток после облучения до начала клинических проявлений поражения кишечника и агранулоцитоза.

**Церебральный синдром** развивается при облучении в дозах более 50 Гр спустя 1-2 часа, обусловлен прямым поражением нервной системы и нарушениями структуры мембран нейроглии и нейроцитов. В ЦНС наиболее радиочувствительны нейроглии и синаптический аппарат. В первые часы после облучения нарушаются микроциркуляция, гематоэнцефалический барьер, развивается острая гипоксия ткани мозга, накапливаются свободные радикалы и пероксиды.

Для церебрального синдрома характерна кратковременная или длительная потеря сознания сразу после облучения. Выходу из коллапса сопутствуют рвота и диарея. Затем появляются гиперестезия, атаксия, тремор, приступы тонико-клонических судорог, гипотония, головная боль, апатия, менингеальный синдром, потеря сознания, кома. Процесс завершается отеком мозга, нарушением центральной регуляции гемодинамики, остановкой дыхания и гибелью через 1-3 дня.

В первые часы после облучения проявляется **первичная реакция** типичной формы ОЛБ, которая продолжается до 2-3 суток. К ее клиническим проявлениям, зависящим от тяжести ОЛБ, относят:

✓ *местные реакции* (первичная кожная эритема, изменения в слизистых, отек подкожной клетчатки, отек слюнных желез);

✓ *нейромоторные симптомы* (общая слабость, быстрая утомляемость, апатия, сонливость);

✓ *нейрососудистые симптомы* (потливость, тяжесть в голове, головная, пониженное или повышенное АД, повышение температуры тела);

✓ *диспептические расстройства* (сухость и горечь во рту, тошнота, рвота, диарея, боли в животе).

Первичная эритема кожи, гиперемия кожи и слизистой наблюдается спустя 6-24 ч после облучения. Эритема кожи лица, шеи, верхней части груди появляется при дозах 5-6 Гр, живота, сгибательных поверхностей рук и ног – 6-7 Гр, спины, разгибательных поверхностей рук и ног – 7-10 Гр.

Патогенез астеновегетативной симптоматики определен токсемией и прямым воздействием радиации на чувствительные к облучению ткани головного мозга – гипоталамус, средний мозг, базальные ганглии, лимбические структуры.

Под действием излучения высвобождаются серотонин, гистамин, кинины, простаноиды, интестинальные олигопептиды, которые поступают в кровь и вызывают спазм гладкой мускулатуры, пилороспазм, гастростаз и антиперистальтические движения. Продукты распада клеток, перекисного окисления липидов, биогенные амины воздействуют на рвотный центр, провоцируя приступы рвоты.

Патогенез диареи обусловлен усилением активности кишечника в результате нарушения нейрогуморальной регуляции секреции и всасывания, при этом угнетается адсорбция, усиливается секреция электролитов и воды из эпителиоцитов в просвет кишечника.

Рвота наступает при ОЛБ:

- I степени – 1-2 раза через 2-3 часа после облучения в 30-50 % случаев;

- II степени – 2-3 раза через 1-2 часа у 70-90 % пострадавших, переносится тяжелее, сопровождается общей слабостью, субфебрильной температурой;

- III степени – многократная до 2 суток спустя 20-40 минут после облучения, сопровождается сухостью во рту, жаждой, слабостью, снижением АД, повышением температуры тела до 38°C, гиперемией кожи, возбуждением сменяющимся сонливостью, атаксией, гиперестезией, дискинезией кишечника, болями в животе;

- IV степени – изнурительная неукротимая рвота до 3-4 суток через 10-30 минут после облучения, сопровождается гиперемией, отеком слизистой рта, околоушных желез, сильной головной болью, светобоязнью, гиперестезией, менингеальными симптомами.

**Латентный период** длится от 7 до 32 суток в зависимости от дозы облучения (при дозе 10 Гр и выше отсутствует) и клинически протекает относительно легко. В первые дни после облучения обнаруживается лимфопения, спустя несколько суток нарастает нейтропения, тромбоцитопения, исчезают ретикулоциты, развивается гипоплазия костного мозга. На 6-14-е сутки при I-II степени тяжести возможен рост числа лейкоцитов и тромбоцитов. Неврологическая симптоматика слабо выражена, постепенно исчезает. Орофарингеальный синдром проявляется при I-II степени ОЛБ слущиванием эпителия, отеком слизистой ротовой полости и длится с 8-9 по 20-25-е сутки заболевания. Более тяжелые поражения обуславливают развитие стома-



тита с некрозом (преимущественно в области локализации лимфоидной ткани глотки), протекающего волнообразно и длящегося 1-1,5 месяца.

Выраженность клинических проявлений *периода разгара* зависит от тяжести поражения. При I степени ОЛБ после латентного периода (4-5 недель) усиливается слабость, возникают астенические явления, нарушается нейровисцеральная регуляция, в периферической крови наблюдается лейкопения, тромбоцитопения, СОЭ – 10-25 мм/ч.

При II степени ОЛБ после 3-4 недель латентного периода развивается выраженный астенический синдром, повышается температура, в крови – лейкопения, тромбоцитопения, СОЭ – 25-40 мм/ч. Появляется кровоточивость, возможны инфекционные осложнения. Продолжительность разгара заболевания – около 2 недель. Выздоровление наиболее вероятно.

При III степени ОЛБ после 8-20 суток латентного периода развивается агранулоцитоз, сопровождаемый инфекционно-токсическим синдромом с выраженной лихорадкой. СОЭ достигает 40-80 мм/час. У трети пострадавших развивается герпетическая инфекция. Возможно развитие почечно-печеночной недостаточности с энцефалопатическими проявлениями. При снижении тромбоцитов до  $(10-20) \times 10^9/\text{л}$  развивается геморрагический синдром с множественными кровоизлияниями в кожу и слизистые, во все жизненно важные органы (мозг, сердце, легкие, ЖКТ). Возникает угроза внутреннего кровотечения с инфекционными осложнениями.

При крайне тяжелой степени ОЛБ латентный период выражен нечетко, ограничивается 3-4 сутками (или отсутствует), характеризуется слабостью, утомляемостью. Причем, с первых суток развивается выраженная гранулоцитопения и тромбоцитопения без признаков abortивного подъема. В разгар болезни с 8-12 суток появляются кишечные нарушения в виде диспептических явлений. Инфекционно-токсический синдром возникает в течение 1-2 недели заболевания, протекает крайне тяжело с явлениями септицемии. Смерть наступает на 11-20 сутки при явлениях токсической энцефалопатии, печеночной и почечной комы, ДВС-синдрома (диссеминированное внутрисосудистое свертывание крови – нарушение свертывания крови из-за высвобождения из тканей тромбопластических веществ).

**Разгар** ОЛБ длится 1-3 недели, после чего может начаться период восстановления. Длительность периода *восстановления* составляет 2-2,5 месяца. В его начале появляется аппетит, нормализуется температура тела и функции ЖКТ, пропадает кровоточивость слизистых.

В крови появляются ретикулоциты и юные нейтрофилы, что указывает на регенерацию костного мозга. Анемия усиливается до 5-6 месяцев после облучения, затем количество эритроцитов постепенно нарастает, исходный уровень восстанавливается за 2-3 месяца.

Спустя 3 месяца от начала болезни при относительно удовлетворительном состоянии выпадают волосы, еще через 1 месяц начинается их рост. Восстановление репродуктивной функции происходит через 6 месяцев. Астенический синдром сохраняется длительно (годы).

После облучения в дозах 3-7 Гр в период восстановления возможно развитие катаракты, поражение сетчатки глаз, повышение внутриглазного давления, появление кровоизлияний в глазное дно с последующим снижением остроты зрения.

Кожа при ее лучевом поражении эпителизуется спустя 2-4 недели. Некрозы заживают в течение нескольких месяцев. После эпителизации кожи возможно развитие повторной эритемы с отеком подкожной клетчатки, в тяжелых случаях сопровождающейся лихорадкой.

**Исходами** ОЛБ могут быть полное и неполное выздоровление или смерть.

К часто встречающимся в отдаленном периоде **последствиям** радиационного поражения относятся:

- ✓ астеновегетативный синдром;
- ✓ гипоталамический синдром;
- ✓ эндокринные нарушения;
- ✓ кардиоваскулярные изменения;
- ✓ умеренная лейкопения и тромбоцитопения;
- ✓ лейкозы и новообразования.

При пролонгированном и фракционированном облучении длительностью ориентировочно 10 суток при разовых или суточных дозах 0,1-0,2 Гр возможно развитие **подострой лучевой болезни**.

При длительном воздействии низких доз излучения с мощностью более 0,25-0,5 Зв/год с накоплением за 2-5 лет дозы выше 1 Зв формируется симптомокомплекс **хронической лучевой болезни** (ХЛБ). Лучевая нагрузка до 0,05-0,1 Зв/год не обуславливает развитие хронической лучевой болезни. При суммарной дозе ниже 1-1,5 Зв клинические формы нечеткие, суммарная доза выше 4-5 Зв вызывает тяжелые формы ХЛБ. Развивается и протекает ХЛБ длительно, нарушенные функции восстанавливаются медленно.

ХЛБ может быть обусловлена равномерным внешним облучением или инкорпорированными радионуклидами с равномерным рас-

пределением в организме ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^3\text{H}$  и другие), а также неравномерным (локальным) внешним облучением или инкорпорированными радиоизотопами с избирательным депонированием ( $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Po}$  и другие).

В течении ХЛБ выделяют периоды формирования, восстановления и исходов. В *период формирования болезни* отмечается преморбидное состояние и полисимптомные проявления. Симптомокомплекс ХЛБ может сформироваться за 1-3 и более лет при работе в неблагоприятных условиях. *Период восстановления* начинается после прекращения облучения или резкого снижения его интенсивности и длится 1-3 и более лет. В *период исходов* возможно полное восстановление здоровья, восстановление с дефектом, стабилизация сформированных изменений, прогрессирование процесса в виде гипопластических, дистрофических, инволютивных, гиперпластических, бластоматозных процессов.

По тяжести течения различают ХЛБ легкую (I степени), среднюю (II степени), тяжелую (III степени). При инкорпорации радионуклидов в дозе 20-70 мКи развивается ХЛБ I степени, 70-150 мКи – II, 150-400 мКи – III степени.

При *ХЛБ I степени* снижается резистентность капилляров, возникают нестабильность пульса, склонность к гипотонии, развиваются астенический синдром, акроцианоз, миокардиодистрофия без признаков сердечной недостаточности, ингибируются функции желез желудочно-кишечного тракта. Со стороны органов кроветворения отмечаются умеренная лейкопения ( $2,0-3,0 \times 10^9/\text{л}$ ), относительный лимфоцитоз, нерезкое торможение созревания миелоидных клеток и плазматическая реакция костного мозга. Прекращение контакта с излучением на фоне лечения приводит к восстановлению функций.

Для *ХЛБ II степени* характерны более разнообразные симптомы, переход функциональных изменений в органические, снижение их обратимости. Присущи миокардиодистрофия, стойкое угнетение секреторной функции желудка и кишечника, функциональные нарушения со стороны печени, умеренная анемия, геморрагический синдром, тромбоцитопения, лейкопения ( $1,5-2,0 \times 10^9/\text{л}$ ), относительный лимфоцитоз. В костном мозге угнетаются все ростки кроветворения. Пациенты нуждаются в многократном стационарном и санаторном лечении.

При *ХЛБ III степени* происходят глубокие стойкие органические изменения. Выражены геморрагический, язвенно-некротический синдромы, инфекционные осложнения, очаговые изменения ЦНС,

тяжелая анемия ( $1,5-2,0 \times 10^{12}/л$ ), лейкопения (менее  $1,5 \times 10^9/л$ ), тромбоцитопения, опустошение костного мозга. Течение прогрессирующее, часто наступает летальный исход. После интенсивной терапии может наступить ремиссия.

**Диагностика** острых радиационных поражений базируется на сопоставлении данных анамнеза и осмотра с клиническим течением поражений и результатами лабораторных исследований. При сборе анамнеза и опросе учитывают расстояние от источника ионизирующего излучения до пациента, длительность и условия его пребывания в зоне заражения радионуклидами, степень защиты, показания индивидуального дозиметра, уровень наведенной радиации, жалобы, общее состояние пациента, проявления первичной реакции, дополнительные данные от лиц, оказывавших помощь или задействованных в эвакуации.

По данным дозиметрии устанавливают дозы облучения, проводят контроль на радиоактивное загрязнение одежды, кожи, слизистых, а также берут пробы крови, мочи, кала для оценки инкорпорации радионуклидов.

При *осмотре* выявляют клинические симптомы и синдромы болезни, перкуссией, пальпацией, аускультацией и инструментальными методами обнаруживают функциональные нарушения критических и некритических органов.

Лабораторные исследования включают общий и биохимический анализы крови, мочи, кала, гематологические исследования, исследования костного мозга, хромосомных мутаций. Радиометрами и спектрометрами изучают наличие радионуклидов в мазках, крови, кале, моче, на коже, приборами СИЧ определяют содержание радионуклидов во внутренних органах и всем организме.

Окончательный диагноз ОЛБ ставится в организациях, оказывающих медицинскую помощь, на основании изучения биологического материала методами радиометрии и гематологических исследований.

Исследования периферической крови проводят не ранее, чем через 16-24 ч после поражения, так как через 5-7 ч после поражения выявляется лейкоцитоз. В первые 2-3 суток при диагностике основную роль играет лимфоцитопения, поэтому оценивают показатели лейкоцитарной формулы с вычислением абсолютного числа лейкоцитов. Затем с течением болезни отмечается нарастание лейкопении, тромбоцитопении, ретикулоцитопении, анемии, повышение СОЭ.

При биохимическом анализе крови выявляются гипоальбуминемия, гипопротеинемия, на миелограмме – угнетение кроветворения.

Диагностическое значение также имеет дегенерация ядер клеток крови в первые часы поражения, усиливающаяся в период разгара лучевой болезни.

Также рекомендуется проведение инструментальных исследований, таких как ЭКГ, ЭЭГ, УЗИ органов брюшной полости, малого таза, щитовидной железы, консультаций узкопрофильных специалистов (гематолога, эндокринолога, невролога и других), которые имеют вспомогательное значение для диагностики.

**Диагностика ХЛБ** проводится с учетом анамнеза, изменений со стороны внутренних органов, крови. Труднее диагностировать ХЛБ I степени. В этом случае, кроме сведений анамнеза, необходимо учитывать данные дозиметрии и радиометрии, а в ряде случаев исследовать костный мозг. Проводятся клинические, лабораторные и инструментальные исследования и консультации узкопрофильных специалистов.

**До начала лечения** лучевой болезни проводится удаление пострадавшего от источника ионизирующего излучения, определение дозы облучения по данным дозиметрии, контроль радиоактивности, при необходимости дезактивация одежды и кожи, забор мазков из носа, открытых и поврежденных участков кожи, исследование проб крови, мочи, кала на содержание инкорпорированных радионуклидов.

В *фазе первичной острой реакции* проводится симптоматическая терапия, включающая назначение противорвотных, сердечно-сосудистых и седативных средств, а также дезинтоксикационная терапия. Хирургическая коррекция угрожающих состояний возможна первые 48 часов, остальные хирургические вмешательства выполняются после восстановления гемопоеза.

В *латентной фазе* продолжается симптоматическая терапия, назначаются витамины, антибактериальные средства. Пациентов в конце латентной фазы помещают в изолированные асептические боксы. В *фазе разгара* большое значение уделяют уходу за пациентами. Для борьбы с инфекционными осложнениями назначают антибиотикотерапию. Герпетическую инфекцию лечат ацикловиром.

Параллельно с антибиотиками назначают противогрибковые средства. Проводится переливание тромбоцитарной массы, применяются системные и местные антигеморрагические средства. Проводят также дезинтоксикационную терапию, десенсибилизацию и витаминотерапию.

Очень важна заместительная терапия в виде переливания компонентов крови, трансплантация аллогенного костного мозга или клеток человеческой эмбриональной печени.

В *фазе раннего восстановления* назначают биостимуляторы, витамины, лейкоген, цианокобаламин и другие стимуляторы кроветворения.

**Лечение ХЛБ** должно быть ранним, комплексным, индивидуальным. Безусловное требование – прекращение контакта с ионизирующим излучением. При ХЛБ I степени используют лечебную физкультуру, физиотерапию, стимуляторы нервной системы, малые транквилизаторы, лечебно-профилактический рацион №1.

Пациенты с ХЛБ II степени нуждаются в нестрогом постельном режиме, щадящей полноценной витаминизированной диете, средствах, нормализующих функцию ЦНС, стимуляторах лейкопоза, гемостатических, анаболических средствах и антибиотиках. Проводят трансфузию эритроцитарной массы, кровезаменителей. По показаниям назначается лечебная физкультура и физиотерапия. Срок лечения 1,5-2 месяца.

При ХЛБ III степени проводится аналогичное лечение, что и при II степени, но более длительное, интенсивное. Существенное значение имеет лечение глубоких трофических расстройств, обменных нарушений, инфекционных и геморрагических осложнений, связанных с гипоплазией костного мозга.

### **Характеристика локальных лучевых поражений**

К локальным, или местным, лучевым поражениям относят *ожоги кожи* (рисунок 3.13) и *подлежащих тканей* при облучении в дозе более 8-10 Гр, *проктиты, сигмоидиты, энтериты, колиты* – более 3 Гр.

В зависимости от степени лучевого повреждения слизистой оболочки мочевого пузыря *циститы* могут быть катаральными, язвенно-некротическими, атрофическими, сопровождающимися нарушением оттока мочи и развитием гидронефроза. Высокая доза облучения может обусловить фиброз тканей стенки мочевого пузыря, приводящий к уменьшению его объема (сморщивание мочевого пузыря).



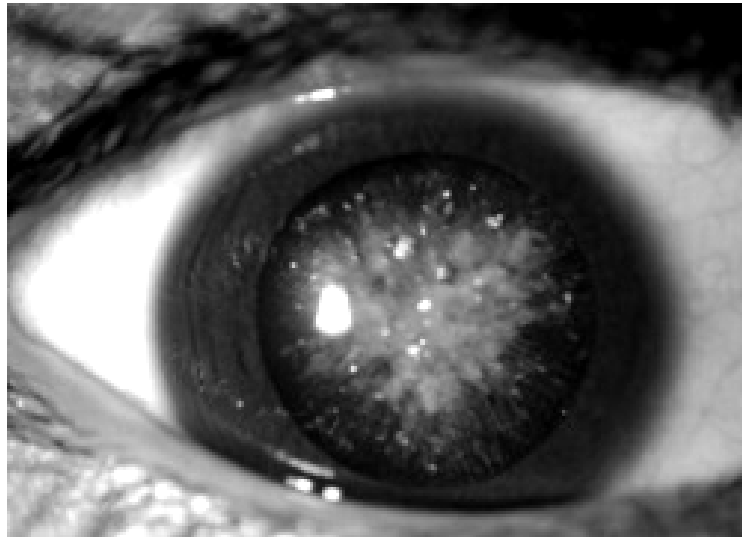
**Рисунок 3.13.** Лучевые ожоги кожи

*Катаракта* в случае облучения дозами 2,5-3 Гр развивается медленно и не у всех, при дозах 7-8 Гр – быстро, у всех пострадавших (рисунок 3.14).

При облучении в дозе до 2,5 Гр может возникнуть неполная кратковременная *стерильность*, стойкое бесплодие у мужчин и женщин развивается при остром облучении в дозах 2,5-6 Гр.

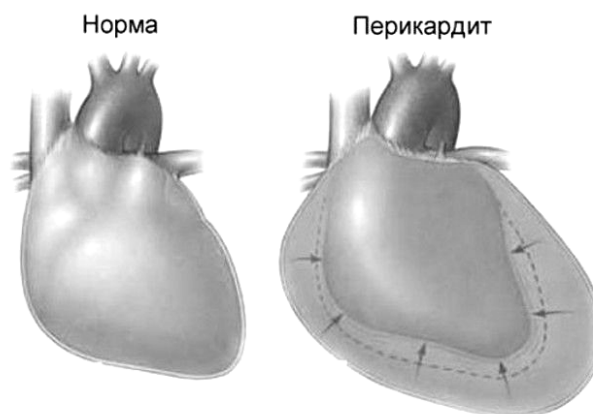
*Патология щитовидной железы* (более 15-20 Гр) проявляется в виде гипотиреоза и аутоиммунного тиреоидита. Такая же доза облучения может обусловить *интерстициальную пневмонию, пневмонит, перикардит* (рисунок 3.15) с геморрагиями и тампонадой сердца. *Нарушения в системе кроветворения* при местных дозах облучения на костный мозг (грудина, бедро), превышающих 8-10 Гр, сопровождаются развитием местной гипоплазии и гипофункции кроветворения.

Облучение в дозах 50-120 Гр обуславливает *остеосклероз* или *остеопороз*.



**Рисунок 3.14.** Лучевая катаракта

Для *местных лучевых поражений* свойственно появление изменений непосредственно в зоне облучения. При облучении кожи развивается эритема (гиперемия с отеком и умеренным зудом) и сухой эпидермит (шелушение эпидермиса). Может развиваться лучевая реакция слизистых оболочек с клиникой мукозита или эпителиита.



**Рисунок 3.15.** Перикардит

Начало эпителиита характеризуется гиперемией, отеком, уплотнением слизистой оболочки. Далее происходит десквамация (чешуйчатое слущивание) эпителия, образуются одиночные эрозии с некро-



тическим налетом (очаговый пленчатый эпителиит). Более обширное отторжение эпителия приводит к слиянию одиночных эрозий (сливной пленчатый эпителиит). Завершается процесс заживлением эрозий с сохранением некоторых остаточных явлений в виде гиперемии и отечности.

Местные лучевые повреждения могут быть ранними и поздними. Лучевые повреждения, развившиеся в срок до 3 месяцев после облучения (восстановление сублетально облученных клеток происходит в течение около 100 дней), считаются *ранними*, после 3 месяцев – *поздними*.

Для клиники *ранних* поражений кожи характерно появление первичной эритемы в течение нескольких первых суток после облучения, развивающейся во время латентного периода, разгара лучевого ожога, периода разрешения. Сильнее повреждаются более радиочувствительные клеточные и тканевые структуры, при этом, по мере увеличения дозы и мощности излучения, продолжительность латентного периода сокращается. Вначале эритема приобретает стойкий характер, появляются сильные боли, повышается температура, возникают пузыри со светлой или сукровичной жидкостью. После вскрытия пузырей выявляются участки глубокого некроза, некротические массы отторгаются с образованием глубоких язв. Возможно развитие ранних лучевых повреждений слизистых оболочек и внутренних органов.

Причиной *поздних* лучевых повреждений является поражение кровеносных и лимфатических сосудов, приводящее к нарушению микроциркуляции и гипоксии, а далее фиброза и склероза различных структур. При поздних лучевых поражениях кожи развиваются атрофический или гипертрофический дерматит, фиброз, индуративный отек, лучевая язва, некроз. Для лучевых поражений слизистых оболочек характерны атрофия, лучевая язва, рубцовые стенозы, свищи, некрозы, внутренних органов – фиброзы, язвы, некрозы. Склерозирование кожи, подкожной клетчатки и атрофия мышц могут обусловить контрактуру суставов.

Характер лучевого поражения кожи зависит от вида и энергии излучения. Максимальная поглощенная доза при  $\gamma$ -облучении отмечается на глубине 2-5 мм ткани, основная доза приходится на подкожную клетчатку, поражение эпидермиса при этом минимально. Поэтому, например  $\gamma$ -терапия онкологических пациентов обуславливает поздние поражения в виде подкожного фиброза и прогрессирующих лучевых язв. Лучевое поражение эпидермиса в этом случае происходит на выходе  $\gamma$ -лучей из тела, чаще при облучении конечностей.

Для мягкого рентгеновского излучения и  $\beta$ -лучей более свойственно поражение эпидермиса. При этом глубина лучевого поражения кожи для  $\beta$ -частиц составляет около 0,3 мм, поражения волосяных фолликулов и выпадения волос не происходит. Поражения кожи при поверхностном лучевом ожоге заживают быстро, но в дальнейшем эпидермис истончается и атрофируется, появляется пигментация. При высокой энергии  $\beta$ -излучения (1,5-3,5 МэВ) кожа поражается на всю глубину.

Кожный покров имеет различные по радиочувствительности участки. Наиболее чувствительна к облучению кожа подмышечной и паховой областей и внутренней поверхности плеча и бедер, наиболее устойчива – кожа спины.

Клинические проявления наблюдаются при облучении кожи в дозах более 8 Гр (таблица 3.2).

**Таблица 3.2** – Зависимость тяжести лучевого поражения кожи от дозы облучения

Доза облучения, степень тяжести	Первичная эритема	Скрытый период	Период разгара
8-12 Гр, легкая	Часы	15-20 суток	Вторичная эритема
12-20 Гр, средняя	2-3 суток	10-15 суток	Вторичная эритема, отек кожи, пузыри
20-25 Гр, тяжелая	3-6 суток	7-14 суток	Вторичная эритема, отек кожи, пузыри, эрозии, язвы, гнойные инфекции
26-30 Гр, крайне тяжелая	Через 2-3 дня переход в разгар заболевания		Отек кожи, боль, кровоизлияния, некроз кожи

Доза облучения кожи 8-12 Гр обуславливает *сухой радиационный эпидермит (легкая (I) степень поражения)*, при котором первичная эритема отсутствует или длится несколько часов, латентный период – до 15-20 суток. Далее развивается вторичная эритема с отчетливыми краями и коричнево-синюшным оттенком, появляются болезненность и отек. Спустя неделю симптомы уменьшаются, на месте поражения остается шелушение.

При облучении в дозе 12-20 Гр наблюдается *влажный радиодерматит (средняя (II) степень поражения)* с образованием пузырей. Первичная эритема длится до 2-3 суток, для нее характерны яркая окраска с синюшным оттенком, поверхностное жжение. Может появ-

виться отек кожи и подкожной клетчатки. Скрытый период уменьшается до 10-15 дней.

В период разгара появляется вторичная эритема, быстро развивается отек кожи и подкожной клетчатки, усиливается болезненность, отслаивается эпидермис, развивается лихорадка и общая интоксикация. В отечной коже образуются постепенно сливающиеся пузыри, через несколько дней появляется мокнущая эрозия. Боль становится мучительной, пациенты лишаются сна, худеют.

Самые чувствительные участки, на которых заживление эрозий затягивается на 2-3 недели, располагаются в области пальцев рук и кистей в целом. Через месяц возможно появление вторичной эритемы, как на пораженной, так и непораженной коже.

После облучения в дозах 20-25 Гр развивается осложненный гнойной инфекцией *язвенно-некротический дерматит* (*тяжелая III степень поражения*). В этом случае первичная эритема с отеком кожи и подкожной клетчатки, чувством жжения, напряжения, онемения продолжается от 3 до 6 суток. Присоединяются слабость, сухость во рту, тошнота, головная боль.

Латентный период длится 7-14 суток. Для разгара лучевого ожога характерно глубокое поражение кожи с образованием первичных язв, общей интоксикацией и лихорадкой. Заживление затягивается на несколько месяцев. В течение нескольких лет после облучения могут возникать вторичные язвы.

*Некротический дерматит* возникает после облучения в дозах 26-30 Гр и более (*крайне тяжелая IV степень поражения*), характеризуется обширным некрозом кожи и глубоко расположенных тканей, сильным отеком кожи, местными кровоизлияниями, болью. Скрытый период отсутствует, поражение развивается на фоне первичной эритемы через сутки.

В случае появления пузырей к 3-м суткам после облучения необходима ранняя ампутация. В разгар заболевания присоединяется лихорадочно-токсический синдром с почечно-печеночной недостаточностью и энцефалопатической комой, приводящей к летальному исходу в течение нескольких первых суток.

Заживление пораженных участков сопровождается их атрофией, расстройством местного кровообращения, деформацией тканей, появлением контрактур смежных суставов.

Поражение 30-40 % поверхности кожи II и тяжелее степени часто несовместимо с жизнью.

**Диагностика местных лучевых поражений**, также как и диагностика ОЛБ и ХЛБ, основывается на сопоставлении данных анамнеза, осмотра с клиническим течением и результатами лабораторных и инструментальных исследований. Обязательным является установление дозы облучения и определение радиоактивного загрязнения кожного покрова, слизистых и одежды, радиометрические исследования мочи, кала.

Для диагностики местных лучевых поражений кожи самым важным моментом является осмотр, при котором врач изучает локализацию, цвет, очертания, границы, поверхность, форму, глубину залегания морфологических элементов, их взаимное соотношение, уточняет динамику процесса. Также определяют состояние подкожной жировой клетчатки, наличие рубцов и пигментаций, назначают патогистологическое исследование биопсийного материала.

Из лабораторных методов применяют гематологические исследования крови, исследования мочи и кала, ИФА-диагностику, иммунологические исследования.

Инструментальные исследования включают ЭКГ, ЭЭГ, УЗИ органов брюшной полости, малого таза, щитовидной железы, фиброгастроуденоскопию, ректороманоскопию.

При необходимости назначаются консультации гематолога, офтальмолога, эндокринолога, дерматолога, гастроэнтеролога, уролога, кардиолога, пульмонолога.

**Лечение лучевых поражений** кожи и слизистых оболочек требует применения мазей с метилурацилом, ускоряющим клеточную регенерацию клеток, способствующим ранозаживлению, обладающим противовоспалительными свойствами. С этой целью используют *мазь метилурациловую 10 %*, а также мази «Левомеколь», «Левосин», «Диоксиколь», оказывающие сочетанное метаболическое, антибактериальное и противовоспалительное действие. Дополнительный пероральный прием метилурацила стимулирует лейкопоэз.

При появлении первичной эритемы пораженную кожу орошают аэрозолями «Оксикорт», «Ливиан». Для лечения лучевых поражений кожи I и II степени с эритемой, отеком, сухим или влажным шелушением в течение 10-20 суток применяют аэрозоль «Лиоксазол». Данное лекарственное средство предотвращает ранний спазм артерий, улучшает кровоснабжение в пораженном участке, ускоряет эпителизацию, оказывает обезболивающее, противовоспалительное, бактерицидное действие.

В латентном периоде назначают поливитамины, антигистаминные и кальцийсодержащие средства.

Местное лечение лучевого ожога направлено на предотвращение инфицирования поверхностей. Для этого накладывают повязки с содержащими антибиотики, антисептики, кортикостероиды, антиоксиданты мягкими лекарственными формами (эмульсия *стрептомициновая*, линимент *бутинола*, мазь *преднизолоновая*, мази «*Синалар*», «*Синтезон*» и другие), а также коллагеновые покрытия («*Комбукт*»). В качестве перевязочного материала и постельного белья используют бактерицидные ткани.

Появление раневой поверхности является показанием к назначению антибиотиков широкого спектра действия.

Для местного лечения лучевых язв с гнойным отделяемым применяют растворы антисептиков и протеолитических ферментов. После появления грануляций и очищения язв назначают мази с *солкосерилом*, *актовегином*, «*Локакортен*», «*Фторокорт*», «*Флуцинар*», *масло облепихи*, линимент *бутинола*.

При поражении кожи в дозе более 50 Гр по причине невозможности заживления ран показано иссечение пораженных тканей и применение кожной пластики.

Для снятия болевых ощущений используют мази с *новокаином*, *анестезином*, *дикаином*, при мучительных болях назначают наркотические средства (*промедол*, *пантопон*, *морфин*) либо проводят нейролептаналгезию *дроперидолом*. При общем беспокойстве используют транквилизаторы.

В лечении тяжелых местных поражений с нарастающим отеком и болями необходимо использовать дезинтоксикационную и дезагрегационную терапию. Для этого парентерально вводят плазмозаменяющие и дезинтоксикационные растворы «*Полиглюкин*», «*Реополиглюкин*», «*Гемодез*», «*Неогемодез*», а также физиологические растворы с *кокарбоксилазой*, *тренталом*, *солкосерилом*, антипротеолитическими средствами (*контрикалом*, *гордоксом*, *трасилолом*). По показаниям проводят цито- и плазмофорез, гемо- и плазмосорбцию.

При тяжелых поражениях кожи для профилактики ДВС-синдрома, начиная с периода первичной эритемы, вводят свежезамороженную плазму и гепарин.

При иммунизации компонентами крови используют антигистаминные средства либо стероидные гормоны.

**Лечение других локальных лучевых повреждений** зависит от клинических проявлений и степени повреждения и включает этио-

тропную и симптоматическую терапию, при необходимости – оперативные вмешательства.

### **Особенности лучевых поражений при внутреннем облучении организма**

Радионуклиды попадают внутрь свыше допустимого годового поступления в *условиях профессионального контакта* при выполнении ремонта в активных зонах АЭС, получении ядерного топлива, переработке руд, использовании радионуклидов в различных целях (технических, исследовательских, медицинских), а также при нарушении правил работы с радионуклидами.

Внутреннее облучение *населения* происходит в случае аварийных ситуаций, производственных выбросов, разгерметизации радиоактивных источников, загрязнения воды и продуктов питания, в том числе и при ядерных взрывах, использования радионуклидов для лечения злокачественных новообразований, а также при нахождении людей в местах захоронения радиоактивных отходов.

Вследствие длительного поглощения тканями энергии при распаде радиоактивных веществ и их депонирования в радиочувствительных органах внутреннее облучение считается особо опасным.

Формирование доз облучения организма и отдельных органов зависит от:

- количества поступившего радионуклида и энергии его излучения;
- пути поступления радионуклидов;
- дисперсности и растворимости радионуклидов;
- транспортабельности нерастворимых радионуклидов;
- распределения радиоактивных веществ.

Радиоактивные вещества могут поступать в организм:

- *пероральным*;
- *ингаляционным*;
- *перкутанным* (через неповрежденную кожу);
- *раневым* (через поврежденную кожу или рану) путями.

Пероральным путем радионуклиды поступают с загрязненными продуктами питания или водой. *Пероральный* путь поступления характерен для населения, проживающего на загрязненных территориях. Количество поступившего внутрь радионуклида зависит от его содержания в продуктах.

Поступившие с продуктами питания и водой радионуклиды всасываются в кишечнике. Отношение активности поступивших в кровь к суммарной активности поступивших в ЖКТ, легкие или на кожу радиоактивных веществ называется *коэффициентом резорбции*. Коэффициенты резорбции радионуклидов в органах, субклеточных структурах, межклеточном веществе различны. Резорбция радионуклидов из одного и того же депо при одинаковых условиях и их содержание в организме обратно пропорциональны их атомной массе.

Скорость всасывания радионуклидов из первичных депо убывает в следующем порядке: внутрибрюшинное, ингаляционное, внутримышечное, пероральное, нажное поступление и зависит от:

- физико-химических свойств радиоактивных веществ;
- физиологического состояния организма;
- морфологических и функциональных особенностей всасывающей ткани.

Периоды полувыведения радионуклидов могут составлять от секунд до сотен лет.

Обмен радионуклидов в организме протекает в четыре этапа:

- всасывание из дыхательных путей, ЖКТ, кожи, раневой поверхности и образование в месте поступления первичного депо;
- транспорт из первичного депо в кровь и лимфу;
- включение в ткани «критических» органов;
- выведение различными путями.

В ЖКТ сначала радионуклиды поступают в клетки кишечника, где происходит их метаболизм, а затем в кровь и лимфу. Через клеточные мембраны проникают *пассивной диффузией* и *активным транспортом* (против электрохимического градиента).

Всасывание радиоактивных веществ в ЖКТ зависит от их растворимости, связанной с валентностью. Практически полностью всасываются элементы I, VII группы и второго периода, плохо – III группы, лантаноиды и трансураниевые (кроме урана и таллия). Плохо всасываются  $\alpha$ -излучатели, хорошо –  $\beta$ -излучатели. Коэффициенты всасывания некоторых элементов приведены в таблице 3.3.

Плохо всасываемые нерастворимые радионуклиды вызывают облучение стенки кишечника в течение 30-48 часов, затем выводятся с калом. Растворимые соединения, преимущественно всасываются в тонком кишечнике, имеющем большую всасывающую поверхность, в меньшей степени – в желудке и толстой кишке.

Резорбция продуктов ядерного деления (ПЯД) в случае ядерных взрывов зависит от их «возраста», вида взрыва (воздушный, назем-

ный, подводный, подземный), типа заряда (атомный, термоядерный), состава подстилающего грунта. В «молодых» ПЯД преобладают хорошо резорбируемые  $^{131-135}\text{I}$ ,  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ , а в «старых» – слабо всасывающиеся  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{95}\text{Zr}$  и другие. Более высокой биологической доступностью обладают молодые продукты воздушных и подводных атомных взрывов. Резорбция продуктов термоядерных взрывов ниже в 2-4 раза по причине высокого содержания слабо всасывающегося  $^{239}\text{Np}$ . Продукты наземных взрывов на силикатных почвогрунтах всасываются в значительно меньшем количестве, чем на меловых.

**Таблица 3.3** – Коэффициенты всасывания в ЖКТ некоторых элементов

Элементы	К	Элементы	К
Водород	1,0	Медь	0,5
Калий	1,0	Цинк	0,5
Рубидий	1,0	Стронций	0,3
Цезий	1,0	Кадмий	0,1
Углерод	1,0	Золото	0,1
Азот	1,0	Ртуть	0,4
Фтор	1,0	Свинец	0,2
Хлор	1,0	Полоний	0,1
Бром	1,0	Алюминий	0,005
Йод	1,0	Цирконий	0,002
Радон	1,0	Америций	0,001
Уран	0,2	Плутоний	0,0005

В результате депонирования радионуклидов в органах и тканях, выведения и физического распада происходит постепенное снижение в организме их уровня.

Уровень резорбции радиоактивных продуктов зависит от возраста человека (различные скорости обменных процессов). У молодых людей радионуклиды всасываются быстрее и в больших количествах. Растущий организм нуждается в большем количестве минеральных солей, поэтому в костной ткани детей радиостронция содержится в несколько раз больше, чем у взрослых.

Резорбция и скорость выведения радионуклидов зависит от:

- пола;
- физиологического состояния организма (во время беременности и лактации концентрация  $^{131}\text{I}$  в щитовидной железе будет более высокой, выведение остеотропных нуклидов – более медленным);



– режима питания (из мясной пищи стронций более биодоступен, так как находится в ней в водорастворимой форме; натошак радионуклиды всасываются быстрее; белок замедляет накопление цезия и ускоряет его выведение; избыточное количество кальция и магния в пище понижает резорбцию стронция, недостаточное – повышает; высокоминерализованная вода препятствует накоплению стронция, стабильный йод – радиоактивного йода).

Замедлять резорбцию радионуклидов первоначально может внешнее  $\gamma$ -облучение, так как нарушается моторная функция кишечника и угнетается всасывающая способность. Однако в случае тяжелых поражений проницаемость кишечника увеличивается, что, напротив, приводит к повышению резорбции.

При длительном постоянном поступлении радионуклиды накапливаются в организме в большем количестве (особенно в критических органах), чем содержатся в окружающей среде. Со временем интенсивность накопления радионуклидов снижается до определенного предела и наступает состояние равновесия между поступившим и выведенным количеством (таблица 3.4).

Предотвращение всасывания радионуклидов достигается применением энтеросорбентов, при этом радионуклиды удерживаются в ЖКТ и выводятся с калом. При низких концентрациях радионуклидов сорбенты малоэффективны.

*Ингаляционным* путем радиоактивные вещества поступают с вдыхаемым воздухом в виде газов, паров, аэрозолей. По причине большого объема вдыхаемого воздуха и большой площади поверхности дыхательных путей этот путь наиболее опасен. Ингаляционный путь более характерен для профессионалов, чем для населения, т.к. по мере удаления от очага концентрация радионуклида снижается, разбавляясь воздушными массами. На интенсивность поступления радионуклидов влияют частота дыхания, влажность воздуха и температура окружающей среды.

*Пути миграции радионуклидов* включают носоглотку, бронхи, легкие, кровь, лимфатическую систему, ЖКТ. Транспорт осажденных радионуклидов через клеточные мембраны зависит от их растворимости. В жидкостях слизистых оболочек нуклиды более растворимы, чем в воде. Мелкие частицы растворяются лучше, чем крупные. Водорастворимые радионуклиды из альвеол поступают в капилляры, включаются в обмен, накапливаются в критических органах, выводятся через почки. Однако перешедшие в раствор радионуклиды спо-

способны образовывать коллоиды с белками и трудно растворимые гидроксиды, что способствует их задержке в легких.

**Таблица 3.4** – Время наступления равновесного состояния у человека при хроническом поступлении радионуклидов (по данным МКРЗ)

Радионуклид	Кратность накопления		Время наступления равновесия, сутки
	в организме	в критическом органе	
$^3\text{H}$	17,3	17,3 (Т)	80
$^{14}\text{C}$	14,4	8,7 (Ж)	66
$^{22}\text{Na}$	15,9	15,9 (Т)	73
$^{32}\text{P}$	14,6	3,0 (К)	89
$^{40}\text{K}$	42,5	42,5 (Т)	300
$^{45}\text{Ca}$	140	126 (К)	1080
$^{140}\text{Ba}$	0,8	0,55 (К)	72
$^{140}\text{La}$	0,0002	0,0001 (К)	11
$^{144}\text{Ce}$	0,03	0,01 (К)	1270
$^{89}\text{Sr}$	22	15 (К)	334
$^{90}\text{Sr}$	2430	912 (К)	25500
$^{91}\text{Y}$	0,008	0,008 (Т)	385
$^{95}\text{Zr}$	0,008	0,008 (Т)	368
$^{131}\text{I}$	11	3,3 (Щ)	5,0
$^{134}\text{Cs}$	94	69 (М)	431
$^{137}\text{Cs}$	101	81 (М)	465
$^{232-238}\text{U}$	0,014	0,014 (К)	666
$^{238-239}\text{Pu}$	0,2	0,14 (К)	25500
$^{241}\text{Am}$	1,42	0,5 (П, К)	25500
$^{249}\text{Cf}$	0,43	0,46 (К)	25500

Примечание: Т – все тело, Ж – жировая ткань, М – мышечная ткань, К – костная ткань, П – печень, Щ – щитовидная железа.

Нерастворенные частицы, осевшие в носоглотке и трахеобронхиальной области, поступают в ротовую полость, заглатываются и выводятся с калом в ближайшие дни. Малорастворимые в воде и жирорастворимые радионуклиды субмикронного размера поступают в лимфатические капилляры, затем в регионарные лимфоузлы легких и в альвеолы, где постепенно накапливаются и перемещаются на периферию легких.

По скорости выведения из легких с учетом эффективного периода полувыведения ( $T_{\text{эф}}$ ) все радионуклиды подразделяются на классы

Б (быстрый) с  $T_{эф}$  менее 10 суток, П (промежуточный) с  $T_{эф}$  от 10 до 100 суток и М (медленный) с  $T_{эф}$  более 100 суток.

*Перкутанным* путем радионуклиды чаще поступают с загрязненной кожи рук. Проницаемость кожи для радионуклидов зависит от:

- их агрегатного состояния, способности к гидролизу и комплексообразованию;
- кислотности и состояния кожи.

Количество радионуклидов, поступивших через кожу, обуславливается плотностью и площадью загрязнения, а также временем пребывания на коже.

Перкутанный путь поступления радионуклидов имеет значение для профессионалов, кожа рук которых загрязняются радиоактивными веществами в процессе работы. Также загрязнение кожи радионуклидами может произойти при их выпадении из облака, переносе с загрязненной местности, одежды, оборудования.

Радионуклиды проникают через клетки и межклеточные пространства, потовые, сальные железы и волосяные фолликулы. Чем выше их растворимость в водно-липидных системах, тем сильнее всасывание.

При повреждениях кожи и в присутствии органических растворителей резорбция радиоактивных веществ возрастает. Через неповрежденную кожу радионуклиды всасываются в 200-300 раз хуже, чем через ЖКТ (кроме соединений йода, оксида трития, уранилфторида и уранилнитрата). Особенно активно проникает тритий (полностью поглощается через час после попадания водного раствора на кожу). Хорошо проникают в кожу изотопы молибдена, в меньших количествах – цезий, стронций и трансурановые соединения.

Полученная доза зависит от площади загрязнения, активности радионуклидов, экспозиции. Ожоги кожи часто вызывают  $\beta$ -излучатели, реже –  $\gamma$ -излучатели, не вызывают –  $\alpha$ -излучатели.

Радионуклиды, достигшие кровеносных и лимфатических сосудов, с кровью и лимфой транспортируются по организму. Далее распределяются как радионуклиды, поступившие другими путями.

*Раневым* путем радионуклиды поступают через термические и механические повреждения, при этом рану сложно дезактивировать. Скорость всасывания радиоактивных веществ через поврежденную кожу возрастает в ряду: ожоги термические – ожоги химические – ссадины – раны рваные – раны резаные – раны колотые. Через ожоговые поверхности всасывание медленнее, так как барьером служат

некротизированные ткани. Быстрое всасывание радионуклидов из колотых ран связано с сохранением функции кровеносных и лимфатических сосудов в зоне травмы.

Более высокая всасываемость характерна для радиоактивных изотопов щелочных, щелочноземельных металлов, галогенов, фосфора и других элементов в ионной форме, они полностью резорбируются из колотых ран в виде растворимых солей. В меньших количествах всасываются изотопы редкоземельных элементов (La и лантаноидов, Y, Sc), а также полония и трансурановых элементов.

Более опасны поступающие через поврежденную кожу  $\alpha$ -излучающие элементы.

**Распределение радионуклидов в организме.** Транспорт радионуклидов в органы вторичного депонирования (печень, почки, мышцы) осуществляется через кровь и лимфу. Легко растворимые радиоактивные вещества распределяются достаточно быстро, плохо растворимые – в течение нескольких лет в те же органы и ткани, что и стабильные соединения.

На распределение радионуклидов влияют физико-химические свойства их соединений, наличие стабильного носителя, масса элемента, функциональное состояние организма.

Выделяют **равномерный, скелетный, ретикулоэндотелиальный** тип распределения, а также **избирательное депонирование** в отдельных органах.

Распределение считается **равномерным**, если большая часть обнаруживаемого в организме радионуклида распределена равномерно, при этом тропности к органам не наблюдается, дозы облучения для всех органов примерно одинаковы. Наиболее радиочувствительной является кроветворная ткань, поэтому ее повреждение обуславливает основные биологические эффекты. В организме равномерно распределяются одновалентные катионы (Li, Na, K, Rb, Cs, H и другие), а также углерод.

Для двухвалентных катионов (Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra) характерен **скелетный (остеотропный)** тип распределения. Также в костной ткани депонируются элементы III группы периодической системы (скандий, иттрий), лантан и лантаноиды, актиний и актиноиды (U, Pu, Am и др.), IV группы (Pb, Sn, Zr), V группы (V, Bi, Nb). Закрепление радионуклида в костной ткани происходит по нескольким механизмам. В минеральной части кости фиксируются аналоги кальция (Sr, Ra, Pb, Mg, Be) в виде фосфатов. Ce, Y, La, Zr, Th, Pu, Am, Np обра-

зуют прочные связи с органической частью кости (коллагеном эндоста, периоста, эндотелием гаверсовых каналов).

В скелете имеются участки с различной интенсивностью обмена. В больших количествах радиоактивные вещества накапливаются в зонах активного роста и перестройки. Стронций преимущественно накапливается в губчатых костях, в меньшем количестве – в трубчатых костях. Биологические эффекты развиваются в течение нескольких лет, проявляются генерализованным диффузным остеопорозом, спустя 10 лет и более может возникнуть остеосаркома.

Радиоактивные вещества, тропные к макрофагам, содержащимся в большом количестве в печени, селезенке, лимфатических узлах, костном мозге, распределяются по *ретикулоэндотелиальному* типу и поражают вышеуказанные органы. Накопление радиоактивных веществ также происходит в очагах воспаления в связи с миграцией сюда микро- и макрофагов. К ним относятся трехвалентные (включая лантаноиды и актиноиды) и четырехвалентные (Hf) катионы. Пяти-, шести-, семивалентные элементы распределяются относительно равномерно или накапливаются в селезенке, печени, почках. Для йода, молибдена, железа, цинка, меди и некоторых других нуклидов характерно *распределение с избирательным накоплением* в отдельных органах. Цинк кумулируется в поджелудочной железе, толстой кишке, железо – в костном мозге и эритроцитах, йод – в щитовидной железе, молибден – в радужной оболочке глаза.

Неравномерное накопление радионуклидов обуславливает неравномерность облучения органов и тканей. Когда содержание радионуклида в органе становится больше, чем в крови, распределение завершается.

**Выведение радионуклидов** из организма зависит от:

- формы химического соединения радионуклида;
- распределения;
- функционального состояния организма;
- возраста;
- скорости обмена в организме.

Скорость самоочищения органа определяется периодами физического полураспада –  $T_{\phi}$ , биологического полувыведения –  $T_{\delta}$  и эффективным периодом полувыведения –  $T_{\text{эф}}$ , объединяющим два первых и показывающим, за какой период времени радиоактивность убывает наполовину за счет обоих процессов ( $T_{\text{эф}} = T_{\phi} + T_{\delta} / T_{\phi} - T_{\delta}$ ) (таблица 3.5).

**Таблица 3.5** – Выведение радионуклидов из организма человека

Радионуклид	Периоды полураспада или полувыведения (сутки)		
	физический	биологический	эффективный
$^{24}\text{Na}$	0,6	11	0,6
$^{40}\text{K}$	$1,42 \cdot 10^9$	58	58
$^{45}\text{Ca}$	164	16400	162
$^{54}\text{Mn}$	300	17	5,6
$^{56}\text{Mn}$	0,1	17	0,1
$^{59}\text{Fe}$	45	800	42,7
$^{60}\text{Co}$	19000	9,5	9,5
$^{65}\text{Zn}$	245	933	194
$^{86}\text{Rb}$	18,6	45	13,2
$^{89}\text{Sr}$	50,5	13000	50,3
$^{90}\text{Sr}$	10600	13000	5700
$^{90}\text{Y}$	2,7	14000	2,7
$^{91}\text{Y}$	58	14000	58
$^{95}\text{Zr}$	65	450	56
$^{95}\text{Nb}$	35	760	33,5
$^{103}\text{Ru}$	41	7,3	6,2
$^{106}\text{Ru}$	365	7,3	7,2
$^{132}\text{Te}$	3,2	15	2,6
$^{131}\text{I}$	8,0	138	7,6
$^{132}\text{I}$	0,1	138	0,1
$^{133}\text{I}$	0,9	138	0,9
$^{134}\text{Cs}$	840	70	40
$^{137}\text{Cs}$	11000	70	65
$^{140}\text{Ba}$	12,8	65	10,7
$^{140}\text{La}$	1,7	500	1,7
$^{141}\text{Ce}$	32	563	30
$^{144}\text{Ce}$	290	563	191
$^{210}\text{Po}$	138,4	30	25
$^{235}\text{U}$	$2,6 \cdot 10^{11}$	100	100
$^{238}\text{U}$	$1,7 \cdot 10^{12}$	100	100
$^{237}\text{Np}$	$10 \cdot 10^8$	39000	39000
$^{239}\text{Pu}$	24100	65000	64000

Скорость снижения активности долгоживущих радионуклидов определяется их выведением, короткоживущих – физическим распадом. Наиболее быстро выводятся несвязанные радионуклиды из крови и межклеточной жидкости, медленнее – связанные макромолекулами, еще более медленно – ставшие структурными компонентами клетки в процессе обмена.

Наиболее интенсивно радионуклиды **выводятся** в первые дни после поступления, затем процесс замедляется. Начинается процесс

выведения сразу после поступления радиоактивных веществ в организм и осуществляется с мочой, калом, выдыхаемым воздухом, потом и другими экскретами (материнское молоко, желчь, желудочный и кишечный соки). Выведение радионуклидов зависит от путей их поступления в организм, резорбции и характера распределения.

Основными путями выведения являются *почки и кишечник*. Почками выводятся радиоактивные вещества (до 80 %), которые находятся в крови в свободном состоянии, равномерно распределяются в организме и способны к ультрафильтрации (например, элементы I основной группы (Li, Na, K, Rb, Cs). С мочой выводятся также элементы V-VI групп. На скорость выведения влияют:

- функции почек;
- особенности регуляции водно-солевого обмена;
- уровень реабсорбции нуклидов почечными канальцами.

Через ЖКТ выводятся не резорбированные в нем радионуклиды. В первые дни после попадания в организм радионуклиды в большом количестве поступают с секретом пищеварительных желез в просвет ЖКТ (например, в желудок – Cl, I, Br, в кишечник – Sr, Ba, Ca, K, Cs). С желчью выводятся радиоактивные вещества, депонирующиеся в печени (элементы III основной и IV побочной групп, в том числе лантаноиды, актиноиды и трансурановые элементы). Поступившие в кишечник нуклиды могут повторно всасываться. Газообразные радионуклиды, в основном, выводятся легкими в течение от нескольких до более 100 суток. На скорость выведения влияют частота и глубина дыхания, параметры микроклимата.

На скорость выведения радионуклидов влияет функциональное состояние организма (в период беременности наблюдается деминерализация костной ткани и усиливается выведение остеотропных нуклидов преимущественно из трабекулярной части кости) и возраст (с увеличением возраста выведение замедляется). По скорости различают быстро выводимые и медленно выводимые радионуклиды. Если выделение с мочой – основной путь, почки могут получить высокую дозу облучения. Для быстро выводимых радионуклидов не надо стимулировать диурез, чтобы уменьшить лучевую нагрузку на почки.

Внутреннее облучение по сравнению с внешним облучением характеризуется *неравномерностью, повышенной опасностью, протяженностью, параллельным течением процессов повреждения и восстановления и хронизацией лучевого процесса*.

**Неравномерность** облучения обусловлена «тропностью» отдельных нуклидов к определенным органам и тканям. Существенным

фактором при этом является значение для организма облучаемого органа и степень его радиочувствительности. Кроме этого, радионуклиды неравномерно распределяются в самих органах из-за неоднородности их строения.

Альфа-частицы из-за низкой проникающей способности в основном облучают окружающие источник клетки. Клетки, находящиеся рядом с источником также могут облучаться при депонировании  $\beta$ -излучающих радионуклидов.

Вследствие высокой проникающей способности  $\gamma$ -облучение имеет более равномерный характер. Наиболее интенсивному облучению подвергаются органы дыхания и пищеварения, через которые радионуклиды поступили в организм и органы основного депонирования (щитовидная железа, печень, почки), определяющие течение заболевания.

**Опасность** внутреннего облучения зависит от свойств излучения и его относительной биологической эффективности. Например, опасность  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучающих радионуклидов при поступлении их внутрь организма резко возрастает по сравнению с внешним облучением.

**Протяженный характер** внутреннего облучения обусловлен постоянным возрастанием накопленной дозы до удаления или распада радионуклидов. При дополнительном поступлении в организм «молодых» продуктов ядерного деления, повреждающее действие излучения усиливается. При этом основная часть накопленной дозы формируется в большинстве органов в ближайшие недели.

В скелете доза формируется более длительное время по причине накопления долгоживущих радионуклидов, например, стронция. При растянутом во времени облучении, в связи с протекающими в организме процессами репарации, повреждающее действие излучения слабее.

Динамика формирования дозы в отдельном органе и организме зависит от пути и продолжительности поступления радионуклида. Биологическая эффективность протяженного облучения примерно в 3 раза ниже эффективности острого облучения.

**Параллельное течение процессов повреждения и восстановления при нахождении радионуклидов в организме** характеризуется тем, что процессы повреждения доминируют на первом этапе, а восстановления – на втором. Динамику данных процессов определяют количество поступивших внутрь радионуклидов и функциональное состояние организма.



Возникновение *хронических форм заболеваний* обусловлено длительным присутствием в организме радионуклидов с низкими константами распада и выведения (например, стронций).

**Клинические проявления** лучевых поражений при внутреннем облучении отличаются от таковых при внешнем облучении. Внутреннее облучение обуславливает изменение «классической» периодизации острой лучевой болезни, в частности:

- отсутствие первичной реакции и четких границ между периодами течения;
- более длительное и тяжелое расстройство функций органов пищеварения при пероральном и органов дыхания при ингаляционном поступлении радиоактивных веществ;
- более выраженное обезвоживание организма, раздражение ретикулоэндотелиальной системы, нарушение функций щитовидной железы и печени при поступлении в организм «молодых» короткоживущих продуктов ядерного деления;
- увеличенный период клинического выздоровления при благоприятном течении болезни;
- формирование отдаленных последствий специфического характера.

Острое и хроническое внутреннее облучение может протекать в легкой, средней и тяжелой степени тяжести. Степень тяжести облучения определяет характер нарушений тканей и органов и исход поражений.

При этом радиационные поражения *легкой степени* тяжести развиваются в следующих диапазонах поглощенных доз:

- кишечник – 3-10 Гр;
- щитовидная железа – 30-100 Гр;
- печень – менее 1 Гр.

Радиационным поражениям *средней степени* тяжести соответствуют диапазоны:

- кишечник – около 30 Гр;
- легкие – 15-20 Гр;
- щитовидная железа – 200 Гр;
- печень – 1-2 Гр.

*Тяжелая степень* развивается в следующих диапазонах:

- кишечник 50-100 Гр;
- легкие – около 30 Гр (при ингаляционном поступлении);
- щитовидная железа – 300-500 Гр;

– печень – 3-4 Гр.

При пероральном поступлении радионуклидов в остром периоде преобладает поражение **кишечника**, обусловленное контактным  $\beta$ -облучением и определяющее тяжесть и исход болезни. При поступлении перорально плохо растворимых радионуклидов повреждения слизистой кишечника имеют очаговый характер. Длительная задержка радиоактивных веществ в криптах, участках с высокими ворсинками, а также в региональных лимфатических узлах, способствует местному формированию высоких поглощенных доз и, как следствие, развитию очаговых некрозов слизистой оболочки. Разрушение крипт и ворсинок, повреждение кровеносных сосудов, развитие кишечной флоры, нарушение баланса жидкостей и электролитов, потеря барьерной функции, развитие интоксикации, бактериемии, изменение секреции и ферментообразования в желудке и кишечнике обуславливает желудочно-кишечный синдром с обезвоживанием и инфицированием организма кишечной флорой. При тяжелой степени поражения наблюдаются симптомы острого геморрагического гастроэнтероколита: рвота, диарея, тенезмы, признаки обезвоживания организма, слизь и кровь в кале.

С увеличением дозы облучения повреждения кишечника приобретают более равномерный характер.

**Костный мозг** при легкой и средней степени поражения достаточно быстро регенерирует. Однако длительный характер поражения радионуклидами при поступлении внутрь организма определяет возможность появления гипопластических и предраковых состояний.

Для начального периода поражения характерны:

- ✓ умеренная лимфопения;
- ✓ нейтрофильный лейкоцитоз со сдвигом в лейкоцитарной формуле влево;
- ✓ иногда лейкемоидная реакция костного мозга.

В период разгара болезни развивается лейкопения с качественными изменениями клеток крови в виде цитолиза, фрагментоза, вакуолизации, кариорексиса, пикноза ядра. Затем появляются признаки угнетения лейко- и эритропоэза.

Задержка радиоактивных частиц в **легких** обуславливает высокий уровень облучения, вызывающий радиационный ожог верхних дыхательных путей, а также очаговые кровоизлияния, приводящие к фибринозно-геморрагической пневмонии.

Как при внешнем, так и при внутреннем облучении, возникают расстройства **иммунологической** реактивности, приводящие к повы-

шению чувствительности организма к инфекции, развитию аутоиммунных реакций. Однако при внутреннем облучении подавление иммунитета более выражено, а степень нарушений зависит от степени тяжести поражения. В крови уменьшается число макро- и микрофагочитов, нарушаются их подвижность, поглотительная и переваривающая функции, а также комплемента и белка сыворотки крови – пропердина. В слюне снижается содержание лизоцима, ухудшаются бактерицидные свойства кожи. Разрушение клеток продуцентов антител и блокирование их продуктами распада ткани обуславливает нарушение синтеза антител.

Аутоиммунные процессы способствуют повышению сенсibilизации организма, усилению канцерогенного действия радиации.

Радионуклиды, поступающие внутрь организма, подвергают **гонады** интенсивному облучению, приводя к нарушению функции половых желез, раннему наступлению стерильности, патологическому течению беременности, сокращению жизни потомства.

Эндокринные нарушения при поражении **щитовидной железы** изотопами йода усиливают изменения репродуктивной функции.

Высокая радиочувствительность эндотелия **кровеносных сосудов** обуславливает его повреждение циркулирующими в крови радионуклидами. Изменения в эндотелии приводят к артериокапиллярному фиброзу, нарушению сосудистой регуляции, снижению тонуса сосудов, замедлению кровотока, сокращению площади кровеносного русла в органах, развитию аутоиммунной сосудистой патологии.

Вследствие изменений в сосудах происходит радиационное повреждение головного мозга, сердца, печени, почек, эндокринных желез и других жизненно важных органов.

В условиях хронического облучения также возникают функциональные изменения **нервной деятельности**, для которых характерно развитие трех основных последовательно сменяющих друг друга изменений: нарушения нервно-висцеральной регуляции, астенического синдрома и органических поражений центральной нервной системы. Изменения, характерные для первых двух синдромов, носят обратимый характер, для третьего – необратимы.

При пероральном поступлении радионуклиды депонируются в **печени**, изотопы, выделяющиеся с желчью, могут повторно всасываться в кишечнике, приводя к ее дополнительному облучению. Радионуклиды в печени депонируются неравномерно в виде конгломератов клеток с фагоцитированными частицами, что обуславливает очаговые дистрофические и некротические повреждения.

Внутреннее облучение печени в дозах 0,1-1,0 Гр приводит к кровоизлияниям, отеку, дистрофическим и некротическим изменениям, атрофии печеночных балок. При фракционированном облучении в дозе более 40 Гр развивается лучевой гепатит. Отдаленными последствиями являются жировая дистрофия, снижение массы печени, а при поступлении внутрь гепатотропных нуклидов  $^{140}\text{La}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{147}\text{Pm}$  возможно развитие цирроза.

*Исходами* острого поражения радионуклидами при их поступлении внутрь являются:

- выздоровление полное и неполное;
- переход в хроническую форму;
- смерть.

К *последствиям* радиационного поражения относятся детерминированные и стохастические эффекты, формирующиеся по причине остаточных повреждений. Детерминированные соматические последствия проявляются в виде:

- клеточной гибели;
- нелетальных повреждений клеток;
- гипопластических и склеротических процессов с заменой функциональной ткани фиброзной.

Стохастические онкологические эффекты развиваются практически во всех органах и тканях. Красный костный мозг, молочные, щитовидная, слюнные железы характеризуются высокой предрасположенностью к развитию онкологических заболеваний, желудок, печень, легкие, яичники, кожа – умеренной.

*Диагностика* лучевых поражений при внутреннем облучении проводится аналогично внешнему облучению. При *лечении* внутренних лучевых поражений применяются лекарственные средства, связывающие, инактивирующие, замедляющие всасывание и депонирование, ускоряющие разрушение и выведение радионуклидов из организма, которые будут рассмотрены ниже.

### **Сочетанные и комбинированные радиационные поражения**

*Сочетанные радиационные поражения* развиваются в результате одновременного или последовательного воздействия внешнего излучения, попадания радионуклидов на кожу и слизистые оболочки, а также поступления радионуклидов внутрь организма через органы дыхания и пищеварения, раневые и ожоговые поверхности.

Наиболее часто сочетанные радиационные поражения возникают на местности, загрязненной радионуклидами вследствие радиационных аварий и применения ядерного оружия. Данный вид поражений возникает у лиц, оказавшихся без средств защиты кожи и органов дыхания.

Внешнее облучение в сочетании с попаданием радиоактивных веществ внутрь обуславливает в клиническом течении острой лучевой болезни особенности:

- более выраженную первичную реакцию на облучение с диспептическими и астеногиподинамическими симптомами, первичной эритемой на открытых участках тела, раздражением верхних дыхательных путей и конъюнктивы глаз;
- удлинение и нечеткость границ периода первичной реакции на облучение, снижение длительности скрытого периода или его отсутствие и удлинение периода разгара заболевания и периода восстановления;
- менее выраженную лейкопению в период разгара, изменение сроков наступления и темпов развития агранулоцитоза, раннюю тромбоцитопению и анемию, замедленное восстановление уровня лейкоцитов в период выздоровления;
- более ранние и выраженные проявления эндогенной интоксикации, геморрагического синдрома, более выраженные нарушения функций сердечно-сосудистой, эндокринной и центральной нервной систем;
- повышенный риск отдаленных последствий облучения;
- более частые проявления и легкое течение лучевого поражения кожи;
- повышение вероятности поражения щитовидной железы.

*Комбинированные радиационные поражения* возникают при одновременном или последовательном воздействии на организм ионизирующих излучений и ожогов и (или) механических травм. Они возможны в результате одновременного воздействия поражающих факторов ядерного взрыва вследствие техногенных катастроф и террористических актов на объектах ядерной энергетики.

В развитии комбинированных радиационных поражений выделяют фазы с преобладанием симптомов, вызванных ожогами и (или) механическими травмами (ранения, контузии), а также с преобладанием симптомов радиационного поражения.

В зависимости от числа действующих факторов выделяют *двухфакторные* (радиационно-механические, радиационно-термические)

и *трехфакторные* (радиационно-механо-термические) радиационные поражения.

В формировании комбинированных радиационных поражений выделяют особенности:

- клинические проявления радиационной патологии развиваются одновременно с местными и общими симптомами ожога, раны, перелома;
- преобладание одного, более тяжелого и выраженного в конкретный момент патологического процесса, вид и значение которого может изменяться по мере развития процесса;
- взаимоотношение действующих факторов, проявляющееся в виде более тяжелого течения патологического процесса и повышенной летальности;
- начало периода первичной реакции сразу после облучения, более тяжелое его протекание, снижение длительности скрытого периода или его отсутствие, увеличение длительности периода разгара и периода восстановления, усиление тяжести течения периода разгара;
- более выраженные нарушения сердечно-сосудистой системы;
- более частое развитие инфекций, кахексии;
- утяжеление шока и постшоковых расстройств, угнетение воспалительных реакций, нарушение процессов репаративной регенерации.

В результате одновременного действия нескольких поражающих факторов развивается *синдром взаимного отягощения*. Ожоговые и травматические поражения индуцируют повышение функциональной активности органов и систем, в значительной мере пострадавших от воздействия радиации. Важное значение в патогенезе синдрома взаимного отягощения имеет снижение или утрата устойчивости организма к инфекциям и токсическим веществам, а также нарушения обмена веществ, приводящие к недостаточности ряда органов и систем.

При комбинированных радиационных поражениях необходимо осуществление мероприятий, направленных на профилактику инфекционных осложнений. При оказании первой врачебной помощи, кроме мероприятий, проводимых при травмах, ожогах и радиационных поражениях, необходимо дополнительное назначение антибиотиков на ранних стадиях.

Диагностика и лечение сочетанных и комбинированных радиационных поражений проводится с учетом видов облучения и наличия ожогов и травм.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Стадии развития лучевых поражений.
2. Лучевые поражения клеток, тканей, органов и систем организма.
3. Лучевые поражения организма человека в эмбриональный и постэмбриональный периоды.
4. Пути воздействия ионизирующих излучений на человека.
5. Характеристика острой и хронической лучевой болезни.
6. Характеристика локальных лучевых поражений.
7. Особенности лучевых поражений при внутреннем облучении организма.
8. Сочетанные и комбинированные радиационные поражения.

## ГЛАВА 4

### РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ. ПРОФИЛАКТИКА ЛУЧЕВЫХ ПОРАЖЕНИЙ

#### Правовое регулирование и обеспечение радиационной безопасности

*Радиационная безопасность* населения – это состояние защищенности настоящего и будущих поколений людей от вредного воздействия ионизирующих излучений.

Правовое регулирование в сфере обеспечения радиационной безопасности в Беларуси базируется на Конституции Республики Беларусь и реализуется следующими законами:

- Закон Республики Беларусь № 122-З «О радиационной безопасности населения» от 5 января 1998 г.;
- Закон Республики Беларусь № 426-З «Об использовании атомной энергии» от 30 июля 2008 г.;
- Закон Республики Беларусь № 340-З «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» от 7 января 2012 г.

Также радиационная безопасность координируется актами Президента Республики Беларусь и прочими нормативными правовыми актами, включая технические:

– «Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в пищевых продуктах и питьевой воде (РДУ-99)», утвержденные Постановлением Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь 26.04.1999 г. № 16;

– Санитарные нормы, правила и гигиенические нормативы «Гигиенические требования к проектированию и эксплуатации атомных электростанций», утвержденные Постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь 31.03.2010 г. № 39;

– Санитарные нормы и правила «Требования к радиационной безопасности» и Гигиенический норматив «Критерии оценки радиационного воздействия», утвержденные Постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь 28.12.2012 № 213;

– Санитарные нормы и правила «Требования к обеспечению радиационной безопасности персонала и населения при осуществлении деятельности по использованию атомной энергии и источников ионизирующего излучения», утвержденные Постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь 31.12.2013 № 137;



– Санитарные нормы и правила «Требования к обеспечению радиационной безопасности персонала и населения при обращении с радиоактивными отходами», утвержденные постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь 31.12.2015 №142.

Основополагающим в области обеспечения радиационной безопасности населения является Закон Республики Беларусь «О радиационной безопасности населения» с изменениями и дополнениями, который обуславливает формирование условий для охраны жизни и здоровья людей от вредного влияния ионизирующей радиации.

В данном Законе обозначены *категории облучаемых лиц* и главные *принципы* обеспечения радиационной безопасности. Под **категориями облучаемых** лиц понимают условно выделяемые облучаемые группы людей, отличные по степени контакта с ионизирующим излучением, включающие **население и персонал**. Главные *принципы* обеспечения радиационной безопасности:

- нормирования;
- обоснования;
- оптимизации.

В соответствии с **принципом нормирования** не допускается превышение пределов индивидуальных доз облучения от всех источников ионизирующего излучения. Согласно Закону «О радиационной безопасности населения» основными пределами доз облучения от источников ионизирующего излучения (кроме доз от естественного радиационного фона, техногенно измененного радиационного фона и медицинского облучения) являются:

- для населения средняя годовая эффективная доза – 0,001 Зв или эффективная доза за период жизни (70 лет) – 0,07 Зв;
- для персонала средняя годовая эффективная доза – 0,02 Зв или эффективная доза за время трудовой деятельности 50 лет – 1 Зв.

Согласно **принципу обоснования** не разрешается любая деятельность по применению источников ионизирующей радиации, при которой вред от полученного облучения превышает возможную пользу для человека и населения в целом.

**Принцип оптимизации** отражает необходимость при использовании источника ионизирующего излучения поддерживать пределы индивидуальных доз и количество облучаемых на достижимо малом уровне (с учетом экономических и социальных факторов).

Следует отметить возможность корректировки принципов в зависимости от ситуаций облучения.

Государственное управление в сфере обеспечения радиационной безопасности страны осуществляют:

- ✓ Президент Республики Беларусь;
- ✓ Совет Министров Республики Беларусь;
- ✓ Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь;
- ✓ Министерство здравоохранения Республики Беларусь;
- ✓ Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь;
- ✓ местные исполнительные и распорядительные органы;
- ✓ иные государственные органы и организации.

В частности, Министерство здравоохранения Республики Беларусь:

- ✓ реализует меры по выполнению единой государственной политики;
- ✓ осуществляет государственное санитарно-эпидемиологическое нормирование, в том числе, утверждение санитарных норм и правил, гигиенических нормативов;
- ✓ обеспечивает государственный санитарный надзор за соблюдением законодательства в области санитарно-эпидемиологического благополучия населения;
- ✓ формирует и обеспечивает функционирование единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения населения.

В соответствии с Законом «О радиационной безопасности населения», граждане Республики Беларусь и другие граждане, проживающие на ее территории, имеют право на радиационную безопасность. Это право гарантируется мерами по предотвращению облучения сверх установленных пределов доз, а также выполнению гражданами и персоналом, работающим с источниками ионизирующей радиации, требований по обеспечению радиационной безопасности. При этом пользователи источников ионизирующего излучения обязаны также осуществлять мероприятия по обеспечению радиационной безопасности, а граждане Республики Беларусь и лица, пребывающие на ее территории – непосредственно участвовать в реализации данных мероприятий. Граждане, невыполняющие или нарушающие требования радиационной безопасности, несут ответственность согласно законодательству Республики Беларусь.

Также лица, проживающие и пребывающие на территории республики, имеют право на своевременную полную и достоверную ин-

формацию о радиационной опасности и принимаемых мерах по ее предотвращению, а население загрязненных радионуклидами территорий – на социальную защиту, возмещение причиненных вреда здоровью и убытков имуществу.

**Радиационная безопасность населения** обеспечивается:

- созданием благоприятных условий жизнедеятельности людей;
- установлением квот на облучение от разных источников ионизирующего излучения;
- организацией радиационного контроля;
- эффективностью планирования и проведения мероприятий по радиационной защите в планируемых, аварийных и существующих ситуациях;
- организацией системы информирования о радиационной обстановке.

В связи с указанным в республике осуществляются:

- комплекс правовых, организационных, инженерно- и агротехнических, санитарно-гигиенических, медико-профилактических и иных мер;
- мероприятия по выполнению требований радиационной безопасности республиканскими органами государственного управления, местными исполнительными и распорядительными органами, другими организациями и гражданами;
- информирование населения о радиационной обстановке и мерах по обеспечению радиационной безопасности;
- обучение и воспитание населения в сфере обеспечения радиационной безопасности.

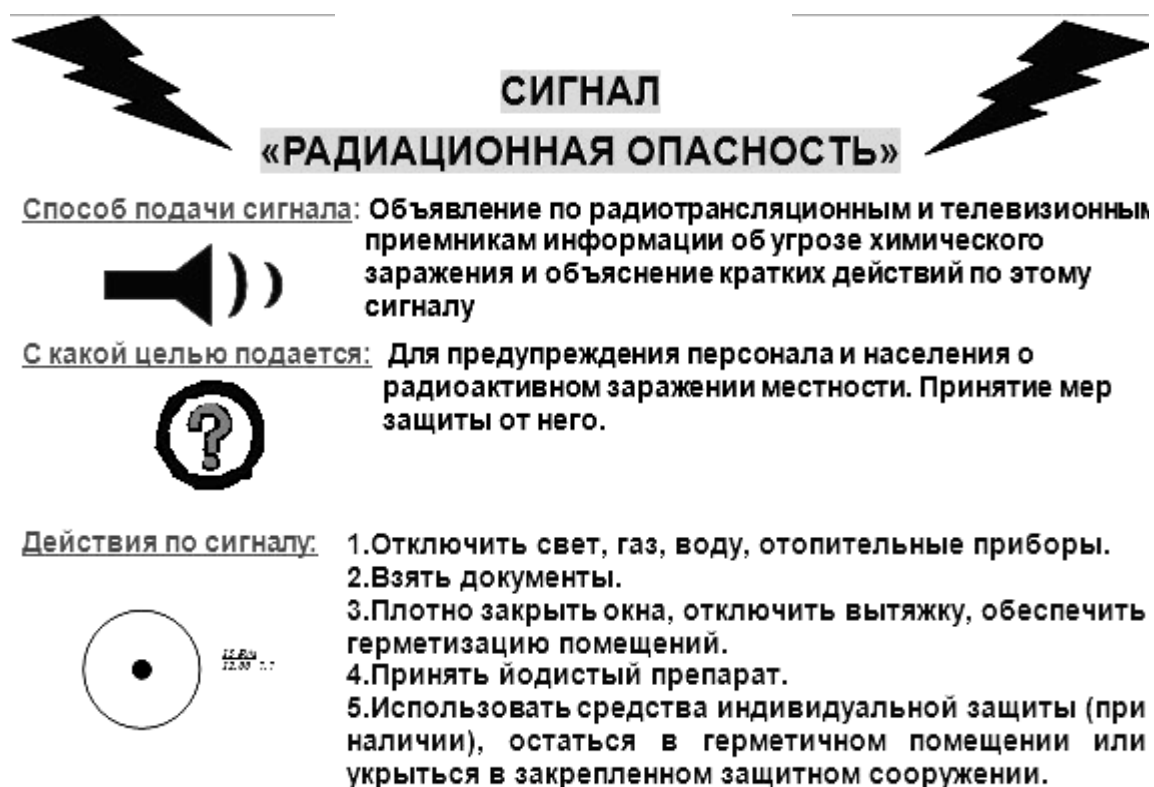
Следует отметить, что **медико-профилактические мероприятия** осуществляются специалистами организаций здравоохранения, включающих больничные, амбулаторно-поликлинические, аптечные, санитарно-эпидемиологические и другие организации. Врачи больниц и поликлиник проводят медицинскую профилактику и лечение лучевых поражений, дают рекомендации по индивидуальной профилактике, провизоры аптек обеспечивают население противолучевыми лекарственными средствами, врачи центров гигиены и эпидемиологии участвуют в проведении санитарно-гигиенических и санитарно-противоэпидемических мероприятий.

Население **информируется** о радиационной обстановке и мерах по обеспечению радиационной безопасности согласно статье 21 «Право граждан и общественных объединений на получение инфор-

мации» Закона Республики Беларусь «О радиационной безопасности населения». Сведения о радиационной обстановке предоставляются гидрометеоцентрами в сводках о предстоящей погоде, а также другими компетентными службами.

*В условиях аварийного облучения* оповещение населения осуществляется с помощью телевидения, радиовещания, рассылки СМС-сообщений, применения специальной аппаратуры и средств подачи звуковых и световых сигналов. В данном случае население немедленно уведомляется о порядке действий, примерном времени начала выпадения радиоактивных осадков, времени приближения радиоактивного облака, а также виде отравляющих веществ. В населенных пунктах оборудуются разнообразные сигнальные аппаратура и средства связи.

Населенные пункты и районы, к которым движется радиоактивное облако, образовавшееся при ядерном взрыве, оповещаются сигналом «Радиационная опасность» (рисунок 4.1). После данного сигнала необходимо срочно надеть противогаз, а при его отсутствии – респиратор либо ватно-марлевую повязку. Затем взять подготовленный заблаговременно запас продуктов питания, средства индивидуальной защиты, предметы первой необходимости и укрыться в противорадиационном убежище.



### Рисунок 4.1. Сигнал «Радиационная опасность»

До сведения подвергшихся радиационному облучению лиц обязательно должна доводиться информация о долгосрочных рисках для здоровья. Также в случае проведения эффективных защитных мероприятий, население должно быть проинформировано о том, что радиационно-обусловленные эффекты для здоровья не предвидятся.

**Обучение и воспитание населения** включает комплексную просветительную, обучающую и собственно воспитательную деятельность, направленную на обеспечение радиационной безопасности. В пределах своей компетенции в устной форме ее проводят работники местных исполнительных и распорядительных органов, руководящие работники предприятий, организаций и учреждений, педагоги, лекторы РГОО «Белорусское общество «Знание», а также медицинские и фармацевтические работники. Большое значение в обучении и воспитании населения принадлежит средствам массовой информации, в частности телевидению, радио, газетам, журналам, интернет-ресурсам.

Мероприятия по радиационной безопасности реализуются приемлемыми для общества средствами и предназначены для **снижения радиоактивного загрязнения среды обитания и облучения населения до наиболее низких уровней**. В целях снижения радиоактивного загрязнения среды обитания проводится комплекс законодательных, технологических, санитарно-технических, планировочных и организационных мероприятий.

**Законодательные** мероприятия направлены на разработку и совершенствование законов, подзаконных актов, статей в законы о радиационной безопасности, санитарно-эпидемическом благополучии населения, охране окружающей среды от загрязнения, а также норм и нормативов для радиационного фактора.

**Технологические** мероприятия позволяют резко ограничить радиоактивное загрязнение среды за счет создания и применения замкнутых и безотходных производственных процессов на предприятиях ядерной энергетики, а также в организациях и учреждениях, использующих источники ионизирующих излучений и радионуклиды.

**Санитарно-технические** мероприятия предусматривают очистку радиоактивных выбросов в атмосферу, сбросов в водоемы и отбросов на почву.

**Планировочные** мероприятия включают зонирование территории населенных мест, их озеленение, создание санитарно-защитных зон источников ионизирующей радиации.

**Организационные** мероприятия заключаются в осуществлении выбросов и сбросов загрязнителей в разное время суток, ограничении времени выбросов и сбросов загрязнителей, сменной работе технологического оборудования.

Для снижения облучения населения проводится **радиационная защита**, под которой подразумевается комплекс мероприятий правового, организационного, инженерного, агротехнического, санитарно-гигиенического и медико-профилактического плана, направленных на снижение интенсивности ионизирующего излучения. Различают *физическую, химическую и биологическую защиту* человека от радиации.

**Физическая защита** человека от радиации включает методы «защиты временем» (нахождение под облучением в течение минимально возможного времени), «защиты количеством» (получение минимально возможной дозы ионизирующего излучения), «защиты расстоянием» (нахождение от источника на максимально возможном расстоянии), и «защиты экранами» (наличие между источником излучения и облучаемым человеком преграды из материалов, поглощающих ионизирующие излучения). Она базируется на законах распространения ионизирующих излучений и характере их взаимодействия с веществом, согласно которым доза облучения прямо пропорциональна интенсивности излучения и времени воздействия и обратно пропорциональна толщине экрана и квадрату расстояния.

Физическая радиационная защита осуществляется **путем**:

- дезактивации территории, зданий, помещений, одежды, продуктов питания, воздуха, воды, почвы;
- использования индивидуальных средств защиты органов дыхания, кожи, частей тела;
- вентиляции помещений;
- санитарных обработок населения, помещений;
- применения минимального количества радиоактивных веществ в приборах и установках;
- использования стройматериалов с минимальным количеством радионуклидов;
- сокращения времени работ и пребывания человека возле источника излучения;
- применения постоянных и передвижных экранов между человеком и источником излучения;
- увеличения расстояния от источника, применения дистанционного управления, робототехники;

– снижения или ограничения потребления воздуха, воды, пищи и пищевых продуктов, загрязненных радионуклидами.

**Химическая радиационная** защита предполагает использование радиопротекторов, радиомитигаторов, химических лекарственных средств, снижающих всасывание и ускоряющих выведение радионуклидов, попавших в организм пероральным, ингаляционным или перкутаным путями, а также синтетических витаминов, микроэлементов, антиоксидантов.

Для **биологической** защиты используются радиопротекторы растительного и животного происхождения, растительная и животная пища, обладающая радиопротекторными свойствами, витамины и минералы, содержащиеся в продуктах питания.

Наряду с планированием и проведением мероприятий по обеспечению радиационной безопасности осуществляется **анализ и оценка**. С целью оценки состояния радиационной безопасности:

– характеризуют радиоактивное загрязнение окружающей среды;

– анализируют результативность мер по соблюдению нормативных правовых актов в сфере обеспечения радиационной безопасности, уровню готовности к эффективному устранению радиационных аварий и их последствий, доз облучения отдельных групп населения и количества облученных лиц;

– определяют вероятность и предполагаемый масштаб радиационных катастроф;

– вычисляют радиационный риск.

Радиационная безопасность регламентируется в ситуациях *планируемого, аварийного и существующего* облучения.

**Ситуация планируемого облучения** возникает при эксплуатации источника либо деятельности, приводящей к облучению от источника, рассчитанной заранее.

**Ситуация аварийного облучения** является результатом аварии, злоумышленного действия или иных непредвиденных обстоятельств и требует немедленного вмешательства с целью недопущения или снижения вредных последствий.

**Ситуация существующего облучения** отмечается при уже имеющемся облучении в течение ряда лет и требует постоянного контроля.

## **Надзор и контроль за обеспечением радиационной безопасности. Радиационный мониторинг**

Государственный надзор за реализацией мер по радиационной безопасности осуществляет Департамент по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. Его основными функциями являются:

- учет, контроль и регистрация источников ионизирующего излучения;
- организация и проведение проверок и мониторинга;
- контроль технических (технологических, поверочных) мероприятий.

За соблюдением Закона «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» в сфере обеспечения радиационной безопасности в Республике Беларусь проводится Государственный санитарный надзор. При его осуществлении проводится наблюдение за выполнением санитарных норм и правил, гигиенических нормативов при:

- воздействии радона и  $\gamma$ -излучения природных радионуклидов;
- медицинском облучении;
- воздействии ионизирующей радиации в ходе выполнения работ с ее источниками;
- обращении с радиоактивными отходами;
- производстве пищевых продуктов и потреблении питьевой воды.

Государственный санитарный надзор реализуется органами и учреждениями санитарно-эпидемиологической службы Министерства здравоохранения Республики Беларусь.

Законом «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате Чернобыльской катастрофы» (1991 г.) установлены три уровня контроля загрязненных радионуклидами территорий:

- государственный;
- ведомственный;
- производственный.

Указанный контроль проводится на территориях:

- загрязненных в результате Чернобыльской аварии (зона А);
- вероятного радиационного воздействия выбросов АЭС (зона Б);
- остальных (зона В).



Контроль радиоактивного загрязнения согласно «Положению о системе контроля радиоактивного загрязнения», утвержденному Постановлением Совета Министров Республики Беларусь 04.05.2015 г. № 372 обеспечивают:

✓ на республиканском уровне – Министерство по чрезвычайным ситуациям, Министерство здравоохранения, Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды, Государственный комитет по стандартизации;

✓ на ведомственном уровне – Министерство сельского хозяйства и продовольствия, Министерство лесного хозяйства, Министерство жилищно-коммунального хозяйства, Министерство энергетики, Белорусский республиканский союз потребителей обществ;

✓ на производственном уровне – организации и индивидуальные предприниматели, осуществляющие деятельность, связанную с контролем радиоактивного загрязнения в связи с катастрофой на Чернобыльской АЭС.

Широкое распространение источников ионизирующего излучения в науке, промышленности, медицине и сельском хозяйстве обуславливает необходимость мер не только государственного, но и *международного контроля* за исполнением требований радиационной безопасности.

В настоящее время действуют межправительственные (МАГАТЭ, НКДР, ЕВРАТОМ, ВОЗ, МОТ) и неправительственные (МКРЗ, ФИРЭ) международные организации. Их основной функцией является разработка рекомендаций по правовому регулированию использования источников ионизирующего излучения в различных странах.

Членами международного агентства по атомной энергии (*МАГАТЭ, IAEA*), созданного для сотрудничества в использовании ядерной энергии в мирных целях, являются более 120 государств, в том числе и Республика Беларусь. Названная организация разработала Международную конвенцию о ядерной безопасности, регулирующую безопасность размещенных на суше гражданских атомных станций.

Сбор, изучение, анализ и распространение данных о природной и антропогенной радиоактивности окружающей среды, а также последствиях такого облучения производит Научный комитет по действию атомной радиации (*НКДАР ООН, UNSCEAR*), образованный Генеральной Ассамблеей ООН.

Обоснованием принципов радиационной защиты и публикацией рекомендаций занимается Международная комиссия по радиологиче-

ской защите (*МКРЗ, ICRP*). Национальные комиссии по радиологической защите (*НМКРЗ*) на основе рекомендаций МКРЗ разрабатывают регламенты облучения в своих странах с учетом научно-технических возможностей, своеобразия социально-экономических и природных условий.

**Национальная комиссия Беларуси по радиационной защите** при Совете Министров Республики Беларусь является межотраслевым научно-экспертным и рекомендательно-консультативным органом по проблемам радиационной безопасности, радиационной защиты и радиационного контроля. Основными задачами комиссии являются:

- анализ и оценка научных данных;
- подготовка рекомендаций республиканским органам государственного управления, государственным научным организациям.

Состояние среды и эффективность мероприятий по охране ее от загрязнения контролируются в процессе **мониторинга окружающей среды**. Мониторинг представляет систему наблюдений, оценок и прогноза состояния природной среды и явлений, биологических ответов на трансформацию окружающей среды под воздействием экологических факторов. В республике существует Национальная система мониторинга окружающей среды. Главная ее цель – обработка данных о состоянии окружающей среды и обеспечение ею заинтересованных министерств и ведомств с целью выбора стратегии природопользования и принятия управленческих решений. Национальная система мониторинга окружающей среды, наряду с биологическим, экологическим, социально-гигиеническим мониторингом, включает и радиационный мониторинг. Под **радиационным мониторингом** понимают систему наблюдений, оценок и прогноза состояния среды обитания под воздействием радиационного фактора. В процессе радиационного мониторинга измеряют мощность экспозиционной дозы, плотность потока частиц, концентрацию радионуклидов в воде, воздухе, почве, продуктах питания, живых организмах, в том числе человеке.

Радиационный мониторинг включает:

- мониторинг *источников* (измерение активности выбросов радионуклидов в окружающую среду, а также мощности дозы внешнего облучения от источников, имеющих отношение к установке либо деятельности);
- мониторинг *окружающей среды* (определение мощности дозы внешнего облучения от источников в окружающей среде, а также концентраций радиоактивных веществ в экологических средах);

- мониторинг *рабочего места*.

В *систему радиационного мониторинга* входят радиационные пункты наблюдений и аккредитованные лаборатории. Сеть постоянного мониторинга окружающей среды Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды включает реперные площадки и ландшафтно-геохимические полигоны. Метеорологическая сеть проводит радиационный мониторинг приземного слоя атмосферы, в том числе измерения мощности экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения, измерения радиоактивных выпадений из атмосферы и радиоактивных аэрозолей. На гидрологических постах больших и средних рек республики, протекающих через загрязненные радионуклидами территории, осуществляется мониторинг поверхностных вод. В зонах потенциального влияния АЭС смежных государств (Чернобыльской, Смоленской, Ровенской и Игналинской) радиационный контроль обеспечивают автоматические системы контроля радиационной ситуации. Радиационный мониторинг лесных территорий включает измерение мощности дозы  $\gamma$ -излучения, содержания радионуклидов в почве, удельной активности и проводится на стационарных пунктах в различных типах леса и зонах радиоактивного загрязнения.

В республике сформирована и эффективно работает система радиационного контроля пищевых продуктов, продовольственного и сельскохозяйственного сырья, пищевой и другой продукции леса. Радиационному контролю подлежит вся продукция, производимая и произрастающая на территории радиоактивного загрязнения. На каждую партию продукции в обязательном порядке оформляется документ, удостоверяющий соответствие содержания радионуклидов установленным уровням.

### **Радиационная безопасность в условиях планируемого облучения**

*К ситуациям планируемого облучения* относится практическая деятельность по:

- производству ядерной энергии, а также производству, поставке и перевозке радиоактивных веществ;
- добыче и переработке полезных ископаемых;
- работе с радиоактивными отходами;
- применению излучений и радиоактивных веществ в медицине, промышленности, ветеринарии и сельском хозяйстве.

Указанная деятельность осуществляется *на радиационных объ-*

*ектах*, под которыми понимают объекты, реализующие обращение с техногенными источниками ионизирующей радиации. Формируют планируемое облучение ядерные, медицинские и ветеринарные радиационные устройства, а также установки для добычи и переработки минеральных руд, переработки радиоактивных веществ, работы с радиоактивными отходами. Особое внимание уделяется планируемому облучению при применении ионизирующих излучений и радионуклидов в *медицине*.

Объекты, занимающиеся изготовлением, хранением, транспортировкой, применением источников ионизирующей радиации и представляющие опасность для людей в виде возможного облучения персонала и населения и радиоактивного загрязнения окружающей среды называются *радиационноопасными*.

По потенциальному радиационному риску различают следующие категории объектов:

- ✓ I – с вероятным радиационным воздействием на население;
- ✓ II – с радиационным воздействием в санитарно-защитной зоне;
- ✓ III – с радиационным воздействием на территории;
- ✓ IV – с радиационным воздействием в помещениях (рисунок 4.2).



**Рисунок 4.2.** Классификация радиационных объектов по потенциальной радиационной опасности

По назначению радиационноопасные объекты делят на:

- объекты ядерного комплекса (ядерно-топливного цикла, с ядерными устройствами, с источниками ионизирующей радиации);
- пункты хранения ядерных материалов, а также радиоактивных веществ, отходов;
- базы ядерного оружия;
- загрязненные радионуклидами территории.

На радиационноопасных объектах используются **закрытые и открытые** источники излучения. Источник, конструкция которого исключает попадание находящихся в нем радионуклидов в окружающую среду в условиях эксплуатации, является **закрытым**. Работа с закрытыми источниками ионизирующего излучения может подвергать персонал только риску внешнего облучения.

Различают закрытые источники ионизирующего излучения **непрерывного и периодического действия**. К *первым* относится радиационная техника, в которой используются радионуклиды в закрытом виде, ко *вторым* – рентгеновские аппараты и ускорители заряженных частиц.

**Открытым** называют источник излучения, при использовании которого содержащиеся в нем радионуклиды могут попадать в окружающую среду. Работа с открытыми радиоактивными источниками может обусловить как внешнее, так и внутреннее облучение персонала в случае поступления радиоактивных изотопов в рабочую зону в виде газов, аэрозолей, твердых и жидких радиоактивных отходов.

Различают открытые источники, на которых применение радиоактивных веществ в открытом виде предусмотрено технологией производства (лаборатории, предприятия и учреждения), и открытые источники, на которых радиоактивные вещества в открытом виде образуются как неизбежные или побочные продукты технологического процесса (предприятия по добыче и переработке радиоактивных руд, атомные электростанции, экспериментальные реакторы, ускорители заряженных частиц).

Максимальная активность дочернего радионуклида, который извлекается путем пропускания определенной жидкости, обуславливает 3 класса работ с использованием открытых источников (таблица 4.1).

Радиационное воздействие на *население* в условиях планируемого облучения может быть обусловлено:

- внешним облучением от радиоактивного облака, загрязненных радионуклидами поверхностей;

- внутренним облучением при попадании в организм радиоактивных веществ с вдыхаемым воздухом и потреблении пищи и воды, загрязненных радионуклидами;
- контактным облучением за счет контаминации кожных покровов радиоактивными веществами.

**Таблица 4.1** – Классы работ с открытыми источниками ионизирующего излучения

Класс работ	Суммарная активность на рабочем месте, приведенная к группе А, Бк
I	более $10^8$
II	от $10^5$ до $10^8$
III	от $10^3$ до $10^5$

Примечание: группа А – активность меньше  $10^3$  Бк.

При обеспечении радиационной безопасности в условиях планируемого облучения при нормальной эксплуатации источников ионизирующего излучения руководствуются принципами **нормирования, обоснования, оптимизации**.

В соответствии с Законом «О радиационной безопасности населения» и Санитарными нормами и правилами «Требования к радиационной безопасности» влияние ионизирующей радиации в условиях планируемого облучения нормируется две *категории облучаемых лиц*:

- персонал;
- все население, а также персонал вне сферы его профессиональной деятельности.

Для категорий облучаемых лиц установлены следующие **нормативы**:

- ✓ основные пределы доз облучения;
- ✓ граничные дозы;
- ✓ производные от основных пределов доз облучения – допустимые уровни монофакторного воздействия (пределы годового поступления, допустимые среднегодовые объемные активности, среднегодовые удельные активности).

**Пределом дозы** называется величина годовой эффективной или эквивалентной дозы техногенного облучения. Соблюдение этого норматива предотвращает появление детерминированных эффектов и уменьшает риск стохастических эффектов до приемлемого уровня.

Основные пределы доз облучения установлены Гигиеническим

нормативом «Критерии оценки радиационного воздействия» (таблица 4.2).

Дополнительные ограничения вводятся для женщин до 45 лет, работающих с источниками ионизирующего излучения. В этом случае эквивалентная доза на поверхности нижней части области живота не должна превышать в месяц 1 мЗв, поступление радионуклидов в организм за год –  $1/20$  предела годового поступления для персонала.

**Таблица 4.2** – Основные пределы доз облучения

Нормируемые величины	Пределы доз для:	
	персонала	населения
Эффективная доза	в среднем 20 мЗв в год за любые последовательные 5 лет (но не выше 50 мЗв в год)	в среднем 1 мЗв в год за любые последовательные 5 лет (но не более 5 мЗв в год)
Эквивалентная доза в хрусталике глаза за год	в среднем 20 мЗв в год за любые последовательные 5 лет (но не более 50 мЗв в год)	15 мЗв
Эквивалентная доза в коже за год	500 мЗв	50 мЗв
Эквивалентная доза в кистях и стопах за год	500 мЗв	50 мЗв

Заблаговременно ограниченная индивидуальная доза облучения от определенного источника, обеспечивающая базовый уровень защиты, называется **граничной дозой** и необходима для установления верхней границы диапазона доз.

Граничной при облучении населения является доза, значение которой находится на верхней границе годовых доз облучения населения в условиях плановой эксплуатации источника ионизирующего облучения.

Оптимальной нижней границей дозы облучения для населения в режиме обычной работы АЭС считается минимально значимая доза облучения, равная 10 мкЗв/год.

**Допустимые уровни монофакторного воздействия** не должны выходить за пределы доз 20 мЗв в год для персонала и 1 мЗв в год для населения.

С целью планирования и реализации **мероприятий, направленных на предупреждение радиационной аварии** во время нормальной эксплуатации радиационноопасных объектов в районе проводят:

- сбор сведений и формирование банка данных о радиационно-опасных объектах;
- мониторинг окружающей среды;
- оценку риска радиационной аварии;
- разработку и внедрение мер по предотвращению и устранению радиационных аварий;
- подготовку управления, сил и средств на случай аварии;
- создание материальной базы для ликвидации последствий радиационной аварии;
- обучение населения методам защиты и действиям при чрезвычайных ситуациях;
- подготовку населения к эвакуации на безопасные территории.

На радиационноопасных объектах постоянно осуществляются следующие мероприятия:

- выполнение правил эксплуатации в штатном режиме;
- контроль исправности систем и элементов безопасности объектов;
- разработка плана мероприятий и инструкций на случай радиационной аварии;
- подготовка средств защиты, санитарной обработки, профилактики и оказания первой помощи;
- контроль функционирования системы экстренного оповещения;
- подготовка квалифицированного персонала, в том числе специализированных аварийных бригад для ликвидации аварии и ее последствий.

Персонал аварийных бригад обеспечивается:

- перечнем радиационных аварий с прогнозом их последствий;
- критериями принятия решений при возникновении радиационной аварии;
- планом мероприятий по защите от последствий аварии персонала и населения;
- средствами оповещения и ликвидации последствий аварии;
- средствами профилактики радиационных поражений и оказания помощи пострадавшим.

В *режиме повышенной готовности* проводятся следующие меры:

- выявление аномалий и их устранение;
- управление объектом при отклонениях в работе;



- усиление контроля и надзора за радиационной обстановкой на объекте и окружающей среде;
- проверку готовности средств защиты, санитарной обработки, профилактики и оказания первой помощи персонала;
- прогноз масштаба аварии;
- выяснение причин ухудшения радиационной обстановки;
- уточнение планов действий и приведение необходимых сил и средств в состояние готовности;
- защита населения и окружающей среды;
- организация при необходимости эвакуации.

В режиме повышенной готовности проводят *инженерную, радиационную и медицинскую* защиту населения. **Инженерная** защита включает подготовку убежищ и противорадиационных укрытий, **радиационная** – подготовку средств индивидуальной защиты, коммунально-бытовых объектов и транспорта для санитарной обработки и дезактивации, предупреждение радиационного загрязнения продуктов питания, пищевого сырья, кормов животных, источников и запасов воды, **медицинская** – подготовку организаций здравоохранения к приему пострадавших, организацию профилактики, контроль загрязненных продуктов питания, пищевого сырья, воды и водоисточников.

К **планируемому медицинскому облучению** относят профилактическое, диагностическое, лечебное и исследовательское облучения. Влияние ионизирующего излучения при планируемом медицинском облучении **пациентов** может быть обусловлено:

- внешним облучением от радиоактивно загрязненных оборудования, источников излучения, поверхностей помещений, в которых производится манипуляция;
- внутренним облучением при поступлении радионуклидов с вдыхаемым воздухом;
- контактным облучением в случае случайного загрязнения радиоактивными веществами кожи.

На **персонал** в условиях планируемого медицинского облучения может влиять:

- ✓ внешнее облучение от контаминированных радиоактивными веществами поверхностей и оборудования рабочих помещений, источников излучения, пациентов, выделений пациентов;
- ✓ внутреннее облучение, обусловленное вдыханием находящихся в воздухе радиоактивных веществ;
- ✓ контактное облучение из-за загрязнения радионуклидами

кожных покровов, спецодежды, средств индивидуальной защиты.

В случае планируемого медицинского облучения радиационная безопасность обеспечивается достижением максимальной пользы от *рентгенорадиологических манипуляций (принцип обоснования)* и всесторонним доведением радиационного ущерба до минимума при безусловном превосходстве пользы для облучаемых лиц над вредом (*принцип оптимизации*). При этом осуществляющие рентгенорадиологическую диагностику и терапию медицинские работники обязаны поддерживать индивидуальную дозу облучения пациента на возможно низком уровне, предупреждая тем самым возможные последствия для здоровья.

Диагностическое облучение пациентов проводят строго по медицинским показаниям (если в данном случае другие методы диагностики не существуют, неинформативны, либо их нельзя применить в отношении конкретного пациента), по назначению врача-специалиста и с письменного согласия пациента. Окончательное решение о проведении назначенной процедуры принимает выполняющий ее врач-радиолог-рентгенолог. Необоснованные назначения и повторения рентгенорадиологических процедур исключаются. Методики проведения рентгенорадиологических манипуляций утверждаются Министерством здравоохранения Республики Беларусь и должны гарантировать отсутствие у пациентов детерминированных лучевых эффектов.

С целью предотвращения излишнего необоснованного облучения населения рекомендуются допустимые контрольные уровни для пациентов, нуждающихся в разной степени рентгенологической и радиологической помощи. В настоящее время выделяют три категории пациентов в зависимости от цели рентгенодиагностических исследований и показаний к их проведению.

Пациентов, которым рентгенодиагностическое обследование назначено в связи с подозрением онкологического заболевания или его наличием, а так же в практике состояний, требующих срочной помощи с кровотечениями, травмами, относят к *категории АД*. При этом облучение в рекомендованном дозовом контрольном уровне не должно обуславливать лучевых поражений.

В случае, если названные исследования осуществляются по клиническим показаниям для установления, уточнения диагноза либо выбора метода лечения при неонкологической патологии, пациенты относятся к *категории БД*. С целью предотвращения риска стохастич-

ческих последствий облучения для данной категории дозовый контрольный уровень снижается в 10 раз по сравнению с категорией АД.

К **категории ВД** относят пациентов, которым обследование назначено с целью профилактики, а также после лечения злокачественных опухолей. В эту категорию также включены лица с предопухоловой патологией (лейкоплакия, фиброаденома), работающие в условиях, связанных с влиянием ионизирующей радиации.

При рентгенодиагностических исследованиях для пациентов рекомендуются следующие величины дозовых контрольных уровней (таблица 4.3).

**Таблица 4.3** – Рекомендуемые дозовые контрольные уровни облучения для разных категорий пациентов

Категории	Дозовый контрольный уровень, мЗв/год
АД	150
БД	15
ВД	1,5

Беременным женщинам, относящимся к категориям БД и ВД и детям до 15 лет, относящимся к категории ВД, рентгенодиагностические исследования назначают только по жизненным показаниям.

Медицинское облучение не производится в следующих случаях:

- ✓ нет соответствующего назначения врача-специалиста;
- ✓ облучение не запланировано программой профилактического медицинского осмотра;
- ✓ нет обоснования облучения консультацией между врачом-радиологом-рентгенологом и направляющим врачом-специалистом;
- ✓ врач-радиолог-рентгенолог отказывается нести ответственность за безопасность пациента;
- ✓ пациент не имеет информации о пользе назначенной процедуры и не предупрежден о связанных с облучением рисках.

При назначении медицинских радиодиагностических исследований *пациенткам детородного возраста* обязательно учитывают фазы менструального цикла. Беременным женщинам и кормящим матерям исследования с использованием открытых источников излучения проводят только по жизненным показаниям.

Годовая эффективная доза облучения в случае проведения профилактических рентгенологических исследований населения и обоснованных рентгенорадиологических обследований персонала должна

быть не более 1 мЗв.

С целью уменьшения облучения персонала введены *граничные дозы*, пациентов – *диагностические референтные уровни* и *граничные дозы*, зависящие от условий медицинского облучения при рентгенологической диагностике (таблица 4.4).

Дозы облучения пациента от проведения каждого рентгенорадиологического исследования вносятся в утвержденные Министерством здравоохранения формы учетной медицинской документации и направляются в установленном порядке в государственный дозиметрический регистр. В республике сформирована ***единая государственная система контроля и учета индивидуальных доз облучения*** для контроля и учета индивидуальных доз облучения населения, полученных в результате медицинских исследований.

**Таблица 4.4** – Рекомендуемые диагностические референтные уровни при медицинском облучении для взрослых пациентов

Область обследования	Проекция	Доза на один снимок, мГр
Поясничная область позвоночника	Передняя – задняя	10
	Латеральная	30
	Пояснично-крестцового сустава	40
Область живота, внутривенная урография и холецистография, бедренный сустав	Передняя – задняя	10
Грудная клетка	Задняя – передняя	0,4
	Латеральная	1,5
Череп	Задняя – передняя	5
	Латеральная	3

Необходимо подчеркнуть, что при работе с закрытыми источниками метод защиты ***количеством*** ограничен требованиями технологического процесса. Защита ***временем*** находит особенно частое применение при работе с источниками относительно малой активности, при прямых манипуляциях с ними персонала. Велика значимость временного фактора при использовании рентгеновских аппаратов в медицинской практике. Повышение квалификации врачебных кадров позволяет сократить время работы аппарата и уменьшить дозовые нагрузки персонала и обследуемых пациентов. Защита ***расстоянием*** обеспечивается достаточным по эргономическим соображениям уда-

лением работающих от излучателя, применением удлиненного инструментария, манипуляторов различного вида, средств малой механизации, дистанционного управления и роботизации производства.

При работе с мощными источниками ионизирующей радиации необходима комбинированная защита расстоянием и *экранами*. В зависимости от вида ионизирующих излучений для изготовления экранов применяются различные материалы, а их толщину определяет мощность излучений. Лучшими материалами для защиты от рентгеновского и  $\gamma$ -излучений являются свинец и уран. С учетом их стоимости на практике применяют экраны из просвинцованного стекла, железа, бетона, баритобетона, железобетона и воды. Строительные материалы часто используются для изготовления экранов, когда одновременно являются строительными конструкциями зданий. Довольно часто для создания экранов на практике используют воду, которая является дешевым защитным материалом.

### **Радиационная безопасность в ситуации аварийного облучения**

Аварийное облучение может произойти на устройствах:

- содержащих радиоактивные вещества и генераторы излучений (ядерных, медицинских, ветеринарных);
- для обращения с радиоактивными отходами;
- для переработки радиоактивных веществ;
- для добычи и переработки минеральных руд.

В результате потери управления указанными радиационными устройствами вследствие неисправности оборудования, ошибочных действий персонала, природных катастроф либо других причин может произойти *радиационное событие* – загрязнение радионуклидами среды обитания, облучение персонала и/или населения.

Различают *ядерные, радиоизотопные и электрофизические радиационные события*. Ядерные события могут произойти на ядерных реакторах атомных электростанций, транспортных средств, радиоизотопные – на полигонах для захоронения радиоактивных отходов, в радиоизотопных лабораториях, блоках радиоизотопной диагностики радиологических отделений, электрофизические – на синхротронах, бетатронах, рентгеновских аппаратах в промышленных и исследовательских лабораториях, рентгенологических и радиологических отделениях больниц.

В результате радиационных событий могут возникать ситуации облучения, включающие **радиационные происшествия** и **радиационные аварии**. В случае если потеря управления источником излучения приводит к облучению людей или радиоактивному загрязнению среды обитания в дозах, превышающих контрольные уровни, но не регламентированных гигиеническими нормативами, говорят о **радиационном происшествии**. **Радиационная авария** обуславливает облучение людей выше установленных нормативов и радиоактивное загрязнение среды обитания.

В зависимости от масштаба распространения радиоактивных веществ и радиационных последствий различают аварии *локальные* (в пределах объекта), *местные* (в пределах санитарно-защитной зоны), *территориальные* (за пределами санитарно-защитной зоны) и *глобальные* (за пределами государства).

В зависимости от вида радиационноопасного объекта различают *аварии*:

- на предприятиях ядерно-топливного цикла;
- на объектах с ядерными установками;
- при перевозке радиоактивных грузов;
- с источниками ионизирующего излучения;
- с ядерным оружием;
- на загрязненных радиоактивными веществами территориях.

Различают также аварии *проектные* с предусмотренными исходными и начальными событиями и инженерно-техническими системами безопасности, и *запроектные*, не предусмотренные проектом.

Радиационные аварии, не связанные с атомными электростанциями, в зависимости от последствий делят на пять групп:

- 1-я – не приводящие к облучению персонала, населения или загрязнению среды обитания аварии;
- 2-я – внешнее облучение превышает дозовый предел;
- 3-я – загрязнение радионуклидами производственной или среды обитания превышает допустимые уровни;
- 4-я – дозы внешнего и внутреннего облучения персонала и населения превышают нормативы;
- 5-я – происходит внешнее и внутреннее облучение персонала, населения, а также загрязнение среды обитания.

Выделяют три последовательные стадии радиационных аварий:

- раннюю;
- промежуточную;

- позднюю.

**Ранняя стадия** протекает с момента аварии до прекращения выброса в атмосферу радионуклидов и завершения формирования на местности радиоактивного следа, **промежуточная** – от окончания формирования радиоактивного следа до принятия необходимых мер защиты населения, **поздняя** – от принятия всех необходимых мер до полного устранения последствий аварии в течение многих лет.

Среди **радиационных** наиболее значимы события на ядерных реакторах. В 1990 г. МАГАТЭ и ЕВРАТОМ была предложена **Международная шкала ядерных событий**, включающая отклонения, происшествия и аварии с уровнем 0-7 (рисунок 4.3). Отклонениями являются незначительные, не оказывающие влияние на радиационную безопасность, события с уровнем ниже 0. К происшествиям относят аномалию (уровень 1), инцидент (уровень 2), серьезный инцидент (уровень 3). Аварии включают аварии локальные (4 уровень), аварии с широкими последствиями (5 уровень), аварии серьезные (6 уровень), аварии крупные (7 уровень).



**Рисунок 4.3.** Международная шкала ядерных событий (INES)

Анализ ядерных событий производится по трем критериям безопасности:

- ухудшение глубокоэшелонированной защиты реактора;

– влияние за пределами площадки на здоровье населения и окружающую среду;

– влияние в пределах площадки (от существенного загрязнения поверхностей и облучения персонала до повреждения активной зоны ядерного реактора).

С учетом указанных критериев безопасности шкалу ядерных событий можно представить в следующем виде (таблицы 4.5, 4.6).

**Таблица 4.5 – Международная шкала ядерных событий**

Уровень	Название	Описание
< 0	Отклонение	Не существенные для безопасности события, при которых не нарушаются эксплуатационные пределы и условия, и которые устраняются адекватными процедурами. Отмечается небольшое распространение загрязнений в контролируемых зонах, облучение персонала не существенно. Часто наблюдается в виде случайных отказов в резервируемой системе, запланированных и нормально осуществленных быстрых остановок реактора.
1	Аномалия	Не существенное для безопасности происшествие с нарушением режима эксплуатации, но с существенным сохранением глубокоэшелонированной защиты. Отмечается небольшое распространение загрязнений в контролируемых зонах, облучение персонала не существенно. Часто наблюдается при отказе оборудования, ошибке персонала, транспортировке радиоактивного материала, обращении с топливом, хранении отходов.
2	Инцидент	Происшествие со значительными нарушениями мер обеспечения безопасности, незначительными нарушениями глубокоэшелонированной защиты при сохранении достаточной глубокоэшелонированной защиты. Отмечается значительное радиоактивное загрязнение среды, облучение персонала в превышающей годовой дозовый предел дозе. Часто наблюдается при отказе устройств безопасности.
3	Серьезный инцидент	Происшествие с разрушением глубокоэшелонированной защиты, отказом систем безопасности, повреждением активной зоны ядерного реактора. Отмечается обширное распространение загрязнения, внешний выброс формирует дозу облучения за пределами площадки порядка десятых долей мЗв. Очень малый выброс: облучение населения на уровне долей ус-



Уро- вень	Название	Описание
		тановленных пределов. Острые лучевые поражения персонала. Наблюдался на АЭС Вандельос, 1989 г.
4	Авария в пределах АЭС	Локальная авария со значительным повреждением или расплавлением активной зоны ядерного реактора. Отмечается обширное распространение загрязнения, внешний выброс формирует дозу облучения за пределами площадки порядка нескольких мЗв. Незначительный выброс: облучение населения на уровне долей установленных пределов. Облучение персонала с высокой вероятностью летального исхода. Наблюдались на заводе по переработке топлива, Уиндскейл, 1973 г., АЭС Сен-Лоран, 1980 г.
5	Авария с риском за пределами АЭС	Авария с повреждением большей части активной зоны ядерного реактора, пожаром или взрывом с выбросом радиоактивных веществ в зоне установки. Отмечается внешний выброс радионуклидов за пределами площадки от сотен до тысяч тераБк йода-131. Ограниченный выброс: облучение населения на уровне долей установленных пределов. Облучение персонала с летальным исходом. Наблюдалась на реакторе в Уиндскейл, 1957 г., АЭС Три-Майл-Айленд, 1979 г.
6	Серьезная авария	Авария с тяжелым повреждением всей активной зоны реактора, сильным пожаром или взрывом с выбросом радиоактивных веществ в зоне установки. Отмечается внешний выброс радионуклидов за пределами площадки от тысяч до десятков тысяч тераБк йода-131. Значительный выброс: облучение населения на уровне долей установленных пределов. Облучение персонала с летальным исходом. Наблюдалась на заводе по переработке топлива, ПО «Маяк», Южный Урал, Россия, 1957 г.
7	Крупная авария	Авария с тяжелым повреждением активной зоны и разрушением реактора, крупным пожаром или взрывом с выбросом радиоактивных веществ в зоне установки. Отмечается внешний выброс из активной зоны ядерного реактора смеси коротко- и долгоживущих радиоактивных продуктов деления за пределами площадки десятками тысяч и выше тераБк I-131. Крупный выброс: острое и отдаленное воздействие на здоровье населения на территории нескольких стран, долговременные экологические последствия. Облучение персонала с летальным исходом.

Уро- вень	Название	Описание
		Наблюдалась на Чернобыльской АЭС, 1986 г.

**Таблица 4.6 – Шкала ядерных событий Росатома**

	Балл	Обозна- чение	Последствия, обстоятельства и признаки наруше- ний в работе АЭС
Аварии	7	A01	Авария с выбросом в окружающую среду большой части РВ, накопленных в активной зоне, в результате которого будут превышены ПД для запроектных аварий. Возможны острые лучевые поражения. Последующее влияние на здоровье населения, проживающего на большой территории с возможностью трансграничного переноса радиоактивных загрязнений, длительное воздействие на окружающую среду.
	6	A02	Авария с выбросом в окружающую среду большого количества РВ, накопленных в активной зоне, в результате которого ПД для проектных аварий будут превышены.
	5	A03	Авария с выбросом в окружающую среду продуктов деления, приводящих к незначительному превышению ПД для проектных аварий.
	4	A04	Авария с выброс РВ в окружающую среду в количествах, превышающих значение для происшествий категории П01, но в результате которого не превышены ПД для населения при проектных авариях. Возможно облучение персонала дозами (порядка 3зв), вызывающими острые лучевые поражения.
Происшеств- вия	3	П01	Происшествие с выбросом в окружающую среду РВ без нарушений пределов безопасной эксплуатации. Загрязнение помещений и оборудования выше уровней, установленных проектом для нормальной эксплуатации, или облучение персонала превышающими ПД.

Примечание: РВ – радиоактивные вещества; ПД – предел дозы.

На ядерных энергетических установках в результате аварийного выброса на здоровье населения и персонала оказывают влияние:

- ✓ внешнее облучение от радиоактивного облака и радиоактивно загрязненных поверхностей;
- ✓ внутреннее облучение, обусловленное вдыханием содержащихся в воздухе радиоактивных веществ и при потреблении загрязненных радионуклидами воды и продуктов питания;
- ✓ контактное облучение по причине загрязнения радиоактив-

ными веществами кожных покровов, спецодежды, средств индивидуальной защиты.

Основными задачами системы радиационной безопасности при *радиационной аварии* являются предотвращение возникновения детерминированных эффектов и снижение до минимума вероятности стохастических эффектов. При этом учитывается, что:

- степень вмешательства должна предотвращать ранние и ограничивать поздние медицинские последствия облучения;
- мероприятия по ликвидации последствий радиационной аварии должны приносить больше пользы, чем вреда;
- польза от снижения дозы ионизирующей радиации после ликвидации последствий радиационной аварии должна была максимальной.

Обнаружение радиационной аварии инициирует экстренные меры, способствующие прерыванию ее формирования, возобновлению контроля над источником излучения, а также снижению доз облучения и количества облученных людей, радиоактивного загрязнения рабочей зоны и окружающей среды, экономического и социального ущерба, обусловленных радиационной аварией до возможно минимальных значений.

Допустимые уровни повышенного облучения персонала радиационного объекта, а также специалистов аварийно-спасательных служб и формирований, участвующих в проведении аварийно-восстановительных работ, представлены в таблице 4.7.

**Таблица 4.7** – Допустимые уровни доз облучения для аварийных работников

Вид мероприятия	Уровень дозы облучения
Спасение людей Предотвращение тяжелых детерминированных эффектов Предотвращение развития катастрофы	Десятикратное значение предела дозы профессионального облучения в течение отдельного года 500 мЗв
Предотвращение высоких коллективных доз	Двукратное значение предела дозы профессионального облучения в течение отдельного года 100 мЗв

Для случаев острого облучения, при которых необходимы срочные меры реагирования в целях предотвращения или минимизации тяжелых детерминированных эффектов, а также для мер реагирования, принимаемых в ситуациях аварийного облучения с целью сни-

жения риска стохастических эффектов, разработаны общие критерии (таблица 4.8, 4.9).

**Таблица 4.8** – Общие критерии реагирования для предотвращения или сведения к минимуму тяжелых детерминированных эффектов

Внешнее облучение (< 10 ч)		
Средняя поглощенная доза в:		При вероятности облучения: немедленно принять предупредительные меры для удержания доз облучения ниже общих критериев, обеспечить информирование и предупреждение населения, провести срочную дезактивацию.
- костном мозге	1 Гр	
- плоде	0,1 Гр	
- ткани	25 Гр на глубине 0,5 см	
- коже	10 Гр на 100 см <sup>2</sup>	
Внутреннее облучение (30 дней)		
Средняя поглощенная доза в:		При облучении: немедленно провести медицинское обследование, назначить лечение, осуществить контроль радиоактивного загрязнения, при возможности провести декорпорацию, обеспечить регистрацию, обеспечить консультации психологов.
- костном мозге	0,2 Гр (РН с АН $\geq 90$ )	
- щитовидной железе	2 Гр (РН с АН $\leq 89$ )	
- легких	30 Гр	
- толстой кишке	20 Гр	
- плоде	0,1 Гр	

Примечание: РН – радионуклиды, АН – атомный номер.

**Ликвидация радиационных аварий и их последствий** требует направленных на предупреждение попадания радионуклидов за пределы загрязненной территории, защиту населения от вредного влияния аварийных факторов и восстановление условий жизнедеятельности аварийно-спасательных работ.

На территории аварии проводится два вида **аварийно-спасательных работ**, перечень которых определяется техническим состоянием объекта, степенью радиоактивного загрязнения объекта и окружающей среды, а также стадией аварии: первоочередные работы и ликвидация последствий аварии на объекте и пострадавшей территории.

Для *предотвращения и снижения облучения* населения при радиационной аварии с выбросом радионуклидов в окружающую среду, проводятся **меры радиационной защиты**, направленные на:

- предупреждение облучения;
- снижение интенсивности и дозы воздействия ионизирующей радиации на человека;

- устранение либо ограничение путей внутреннего облучения;
- защиту клеток, тканей и органов у облучаемых людей.

**Таблица 4.9** – Общие критерии реагирования с целью снижения риска стохастических эффектов

Общие критерии	Прогнозируемая доза	Мероприятия
Эквивалентная доза облучения щитовидной железы вследствие поступления изотопов йода в организм за первые 7 дней	50 мЗв	Блокировка щитовидной железы стабильным йодом, если: во время аварии произошел выброс радиоактивного йода, до или сразу после выброса радиоактивного йода, только в течение короткого периода сразу после поступления радиоактивного йода в организм
Эффективная доза внешнего и внутреннего облучения за первые 7 дней	100 мЗв	Укрытие, эвакуация, дезактивация, ограничение потребления пищевых продуктов, молока и воды, контроль радиоактивного загрязнения, информирование населения
Эквивалентная доза облучения зародыша или плода за первые 7 дней	100 мЗв	
Эффективная доза облучения за год	100 мЗв	Временное переселение, дезактивация, завоз чистых пищевых продуктов, молока и воды, информирование населения
Эквивалентная доза облучения зародыша или плода за период внутриутробного развития	100 мЗв	
Эффективная доза за месяц	100 мЗв	Скрининг, основанный на эквивалентных дозах облучения определенных радиочувствительных органов (основание для медицинского наблюдения), консультирование по основным вопросам
Эквивалентная доза облучения зародыша или плода за период внутриутробного развития	100 мЗв	Консультирование для принятия обоснованных решений в особых случаях

Основными *мерами защиты* являются:

- информирование населения о радиационной ситуации;
- укрытие;
- йодная профилактика;

- использование специальных (респиратор, противогаз) или подручных (носовые платки, полотенца, бумажные салфетки) средств защиты органов дыхания;
- регулирование доступа в аварийную зону;
- зонирование территории, загрязненной радионуклидами;
- особая санитарная обработка;
- дезактивация территорий, зданий и сооружений;
- герметизация помещений на время формирования радиоактивного загрязнения территории;
- захоронение радиоактивных отходов, образовавшихся в результате дезактивации, а также отходов производств с повышенным содержанием радионуклидов;
- медицинская помощь;
- запрещение либо ограничение потребления местных и загрязненных радионуклидами продуктов питания и воды;
- перепрофилирование в лесном и сельском хозяйстве с обеспечением безопасных условий труда;
- уменьшение содержания радионуклидов в сельхозпродукции и продуктах ее переработки, а также продукции личных подсобных хозяйств;
- благоустройство населенных пунктов;
- эвакуация;
- переселение.
- социальные и другие дополнительные меры.

Для оптимальной эффективности защитных мер их проводят в определенные стадии радиационной аварии. На *ранней стадии* оценивают радиационную обстановку, определяют первоочередность проведения спасательных работ, изолируют источник загрязнения, осуществляют мероприятия по предотвращению выброса радиоактивных веществ, защите персонала и населения, снижению распространения радиоактивного загрязнения на менее загрязненные или незагрязненные участки путем его удаления и (или) локализации.

На *промежуточной стадии* стабилизируют радиационную обстановку, проводят ее мониторинг, обеспечивают проведение мероприятий по ликвидации последствий аварии (до достижения контрольных уровней радиоактивного загрязнения) и защите лиц, живущих на загрязненных территориях.

*Поздняя стадия* радиационной аварии подразумевает завершение работ по устранению ее последствий, ликвидацию временных

пунктов хранения радиоактивных отходов или контроль их безопасности, обеспечение условий проживания людей без необходимости применения защитных мер.

Конкретные меры безопасности приведены в таблице 4.10.

**Таблица 4.10** – Меры безопасности в определенные стадии радиационных аварий

Осуществляемое мероприятие	Ранняя стадия	Промежуточная стадия	Поздняя стадия
Оповещение	да	нет	нет
Укрытие	да	да	нет
Йодная профилактика	да	да (нет)	нет
Применение средств индивидуальной защиты	да	нет (да)	нет
Контроль доступа в аварийную зону	да	да	да
Эвакуация	да	да	нет
Санитарная обработка	нет	да	да
Контроль продуктов питания и воды	нет	да	да
Временное переселение	нет	да	да
Удаление скота с загрязненных пастбищ	нет	да	да
Дезактивация территории	нет	нет	да

Когда заранее известно о вероятной угрозе радиоактивного загрязнения и при наличии времени для осуществления предпринимаются **превентивные меры** радиационной защиты, включающие укрытие населения, обеспечение средствами индивидуальной защиты и радиозащитными средствами, подготовка к эвакуации.

По возможности проведение всех мероприятий, кроме превентивных, основывается на данных дозиметрического контроля радиационной обстановки и определения коллективных доз облучения населения.

Для обеспечения максимального эффекта йодной профилактики содержащие стабильный йод средства принимают в кратчайшие сроки после аварии с выбросом изотопов радиоактивного йода. При профилактическом приеме средств со стабильным йодом за 6 ч до поступления радиоизотопов йода обеспечивается практически полная защита щитовидной железы. При более позднем приеме защитный эффект снижается и полностью исчезает (таблица 4.11).

Решение о начале проведения йодной профилактики принимается председателями комиссий по чрезвычайным ситуациям, оповеще-

ние населения осуществляется всеми видами связи с привлечением средств массовой информации. В первые сутки после объявления начала йодной профилактики снабжение населения содержащими стабильный йод лекарственными средствами производится круглосуточно в пунктах выдачи.

**Таблица 4.11 – Эффективность йодной профилактики**

<b>Начало йодной профилактики</b>	<b>Эффективность, %</b>
После подачи сигнала тревоги об угрозе поступления радиойода	90-95
До 2 ч после поступления радиойода	80-90
В течение 2-6 ч после поступления радиойода	60
В течение 6-24 ч после поступления радиойода	0

Уменьшение накопления радиоактивного йода при назначении йодсодержащих средств связано со снижением перехода ионов йода в органическую форму и синтезом тиреоидных гормонов (эффект Вольфа-Чайкова). При ежедневном приеме указанных средств защитные свойства сохраняются с кумулятивным эффектом, прием более 10 дней не рекомендуется.

Йод-индуцированную блокаду щитовидной железы проводят лекарственными средствами, содержащими стабильный йод: калия или натрия йодидом, раствором Люголя, 5 % раствором йода спиртовым, содержащим 2 % калия йодида, а также антиструмином по специальным схемам и согласно инструкциям по применению. При этом обязательно учитывают возможность развития побочного действия и противопоказания к применению названных лекарственных средств.

Таблетки калия йодида принимают по 125 мг 1 раз в день ежедневно до 10 дней после еды, запивая водой. Для приема можно использовать полтаблетки «радиозащитного средства № 2» из гнезда № 6 индивидуальной аптечки гражданской обороны. При отсутствии таблеток калия йодида применяют раствор йода спиртовой 5 % или раствор Люголя внутрь или наружно. Защитный эффект однократного приема длится 24 ч.

При приеме стабильного йода в 5 % случаев возможно действие в виде интратиреоидных (аутоиммунный тиреоидит, аденома щитовидной железы, рецидив диффузного токсического зоба) или экстра-тиреоидных эффектов в виде тошноты, рвоты, диареи, боли в животе



(чаще у детей) или затруднения дыхания, кожной сыпи (чаще у взрослых).

Под **дезактивацией** понимают процесс удаления радиоактивных веществ с различных поверхностей, жидкостей, продуктов. Ее *цель* – снизить радиоактивное загрязнение объектов ниже допустимых норм и обеспечить радиационную безопасность людей и экологическую безопасность биосферы. *Объектами* дезактивации являются почва, воздух, водоемы, посевы, пастбища, растения, животные, сооружения, дороги, транспорт, одежда, человек.

*Способы дезактивации объектов* подразделяются на:

- жидкостные;
- безжидкостные;
- комбинированные.

Разновидностью безжидкостного способа является *биологический*.

**Жидкостные** способы подразумевают использование воды под давлением, дезактивирующих растворов и пены, электрического поля, ультразвука, стирки, экстракции, сорбентов, **безжидкостные** – газа под давлением, пылеотсасывания, механического удаления загрязненного слоя, изоляции загрязненной поверхности, **комбинированные** – фильтрации, очистки с помощью щеток, ветоши, пара, специальных затвердевающих пленок.

Наиболее эффективно применение *окислительно-восстановительных* дезактивирующих средств и дезактивирующих средств *на основе поверхностно-активных веществ*.

Дезактивирующие средства, содержащие *сорбенты* (природные и синтетические), чаще используют для извлечения радионуклидов из газовой и водной среды, в виде добавок к другим дезактивирующим растворам и пленкообразующим материалам.

К основным методам **дезактивации зданий и сооружений** из кирпича, бетона и дерева относят обработку:

- водой под давлением;
- паром;
- металлической щеткой;
- пескоструйным аппаратом;
- латексными пленками;
- щеткой с песком после пылеотсасывания.

**Транспорт** дезактивируют последовательно на оборудованных шести площадками с эстакадами пунктах специальной обработки (ПуСО) по определенной технологии, включающей очистку и обра-

ботку техники, в том числе моторно-ходовую часть с частичной разборкой, водной струей, водой под давлением, паром, парожидкостной струей, пленками, пескоструйными аппаратами, замену масел, прокладок и дозиметрический контроль.

Метод жидкостной или безжидкостной дезактивации *одежды* выбирают в соответствии с особенностями радиоактивного загрязнения и свойствами материалов, для чего одежду предварительно сортируют. Пыль удаляют с помощью пылесоса, щеток, выколачивания, вытряхивания, после чего одежду вымачивают 10 минут в 2 % растворе суспензии на основе глинистых сорбентов, затем стирают или используют экстракцию с помощью избирательных растворителей.

Дезактивацию *дорог* с твердым покрытием производят поливочно-моечными машинами городского коммунального хозяйства или другими специальными машинами. Их принцип работы состоит в удалении радионуклидов с твердого покрытия струей воды, подачи отработанной воды в резервуар, который подвергают захоронению. Чтобы исключить пылеобразование *грунтовые дороги* предварительно поливают водой, а затем используют уборочные машины для снятия верхнего слоя грунта. Если удаление грунта невозможно либо нецелесообразно, его засыпают чистым грунтом толщиной 8-10 см, бетонируют или асфальтируют.

Дезактивацию загрязненных сельскохозяйственных *угодий, лугов* проводят путем скашивания травы, при этом радиоактивность снижается на 25-40 %. Иногда целесообразна вспашка (мелкая до 30 см или глубокая до 70 см) лугов и засеивание их многолетними травами с последующим скашиванием и захоронением травы. Перепашивание снижает миграцию цезия и стронция из почвы в растения на 35-45 %.

Также дезактивация осуществляется окучиванием (после обработки растений опрыскиванием), одним из способов дезактивации угодий является использование сорбентов.

**Эвакуация** – это неотложное, временное перемещение людей с территории с целью предупреждения или уменьшения радиационного облучения в случае аварии. Перемещение на срок более двух месяцев называется *переселением*.

Решение об эвакуации детей и беременных женщин, облученных в дозе до 10 мЗв, принимается в случае мощности экспозиционной дозы 5 мР/час, взрослого населения, облученного в дозе до 50 мЗв, – 25 мР/час.

Эвакуация детей и беременных женщин за пределы 100-километровой зоны АЭС осуществляется при ожидаемой дозе на щитовидную железу 200 мЗв, иного населения – 500 мЗв.

### **Радиационная безопасность в условиях существующего облучения**

Условия существующего облучения отмечаются при нахождении в жилых и производственных зданиях, на загрязненных территориях, потреблении загрязненных радионуклидами воды и пищевых продуктов. Облучение населения и персонала в жилых и производственных помещениях происходит от природных радионуклидов, в том числе радона, содержащихся в почве участка застройки, строительных материалах и конструкциях, водопроводной воде и природном газе.

Для защиты от влияния природных радионуклидов людей в зданиях и сооружениях проводится комплекс защитных мероприятий на стадии проектирования, отвода земельного участка, а также строительства, приемки в эксплуатацию и эксплуатации. В частности, земельный участок для строительства выбирают с допустимым содержанием в почве радона и других природных радионуклидов, контролируют в строительных материалах, конструкциях, воздухе помещений, водопроводной воде, природном газе содержание радиоактивных веществ на этапе приемки в эксплуатацию и в период эксплуатации зданий.

При проектировании жилых и общественных зданий учитывается, что среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность дочерних продуктов радона и торона в воздухе помещений не должна быть выше  $100 \text{ Бк/м}^3$ , в эксплуатируемых зданиях – не выше  $200 \text{ Бк/м}^3$ , мощность эффективной дозы  $\gamma$ -излучения –  $0,2 \text{ мкЗв/ч}$  мощности дозы на открытой местности. В любых используемых строительных материалах эффективная удельная активность природных радионуклидов должна быть ниже  $370 \text{ Бк/кг}$ .

Контролю содержания радиоактивных веществ подлежат также питьевая вода, продовольственное сырье, пищевые продукты, контактирующие с ними материалы, оборудование и тара. Содержание Cs-137 нормируется в питьевой воде, молоке и молочных изделиях, мясе и мясных продуктах, овощах и фруктах, садовых и дикорастущих ягодах и грибах, а также специализированных продуктах детского питания в готовом для употребления виде, Sr-90 – в питьевой воде, молоке и цельномолочной продукции, картофеле и специализированных

продуктах детского питания в готовом для употребления виде (Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в пищевых продуктах и питьевой воде (РДУ-99) (таблица 4.12).

**Таблица 4.12** – Нормируемые величины цезия-137 и стронция-90 в воде и пищевых продуктах

№	Наименование продукта	Бк/кг, Бк/л
<b>Цезий-137</b>		
1	Вода питьевая	10
2	Молоко и цельномолочная продукция	100
3	Творог и творожные изделия	50
4	Масло коровье	100
5	Мясо и мясные продукты, в том числе:	
5.1	говядина, баранина и продукты из них	500
5.2	свинина, птица и продукты из них	180
6	Картофель	80
7	Хлеб и хлебобулочные изделия	40
8	Мука, крупы, сахар	60
9	Жиры растительные	40
10	Жиры животные и маргарин	100
11	Овощи и корнеплоды	100
13	Фрукты	40
14	Садовые ягоды	70
15	Дикорастущие ягоды и консервированные продукты из них	185
16	Грибы свежие	370
17	Специализированные продукты детского питания	37
<b>Стронций-90</b>		
1.	Вода питьевая	0,37
2.	Молоко и цельномолочная продукция	3,7
3.	Хлеб и хлебобулочные изделия	3,7
4.	Картофель	3,7
5.	Специализированные продукты детского питания	1,85

В результате Чернобыльской катастрофы примерно 23 % всей территории Республики Беларусь было загрязнено радионуклидами. Сейчас избыточному радиационному воздействию подвергается более 2 млн. человек пострадавших районов. Суммарная доза облучения, которую получает человек, складывается из внешнего и внутреннего облучения. При плотности загрязнения территории свыше 5 Ки/км<sup>2</sup>

превалирует *внешнее облучение*. *Внутреннее облучение* обеспечивается поступлением радионуклидов с пищей (около 94 %), с водой (около 5 %), вдыхаемым воздухом (около 1 %). Население загрязненных районов получает дозу преимущественно за счет внутреннего облучения.

*Особенностями формирования доз облучения населения*, проживающего на загрязненных территориях, являются пролонгированность облучения, обусловленная долгоживущими радионуклидами цезия, стронция и плутония в совокупности с короткоживущими, сформировавшими дозы облучения на раннем этапе аварии, более высокие дозовые нагрузки у сельских жителей загрязненных территорий по причине использования в пищу продуктов местного производства, более высокие дозовые нагрузки у детей (в 3-5 раз) из-за меньшего веса и более активных обменных процессов в детском организме.

С первого дня аварии на ЧАЭС законодательными и исполнительными органами власти Республики Беларусь приняты ряд мер по обеспечению радиационной безопасности населения. В настоящее время организацию и проведение мероприятий по защите людей регламентируют законы Республики Беларусь «О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на ЧАЭС» (22.02.1991 г., дополнение от 11.12.1991 г.) и «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на ЧАЭС» (12.11.1991 г.).

В соответствии с названными законами устанавливается правовой режим загрязненных территорий, разрабатываются мероприятия по снижению радиационного воздействия на население и экологические системы, а также природовосстановительные мероприятия с учетом рационального использования хозяйственного потенциала этих территорий.

Согласно закону «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС» правовой статус зоны радиоактивного загрязнения получили территории, на которых в результате аварии:

- ✓ образовалось долговременное загрязнение радионуклидами;
- ✓ доза облучения населения превышает 1 мЗв/год;
- ✓ невозможно получать чистую продукцию.

Если дополнительная доза облучения не превышает 1 мЗв/год сверх дозы от естественного фона считается, что условия проживания и трудовая деятельность населения не требует каких-то ограничений. При формировании дополнительной дозы облучения в диапазоне 1-5

мЗв/год проводятся защитные мероприятия, 5 мЗв/год и выше – отселение.

Вся загрязненная радионуклидами территория в зависимости от содержания в почве радионуклидов и величины среднегодовой эффективной дозы делится на 5 зон радиоактивного загрязнения (таблица 4.13).

**Таблица 4.13** – Зонирование загрязненной радионуклидами территории Республики Беларусь

Наименование зоны	Эффек- тивная доза, мЗв/год	Плотность загрязнения, кБк/м <sup>2</sup>		
		Cs-137	Sr-90	Pu-238, -239, -240
Проживания с периодическим радиационным контролем	<1	37-185 (1-5 Ки/км <sup>2</sup> )	5,55-18,5 (0,15-0,5 Ки/км <sup>2</sup> )	0,37-0,74 (0,01-0,02 Ки/км <sup>2</sup> )
Проживания с правом на отсе- ление	1-5	185-555 (5-15 Ки/км <sup>2</sup> )	18,5-74 (0,5-2 Ки/км <sup>2</sup> )	0,74-1,85 (0,02-0,05 Ки/км <sup>2</sup> )
Последующего отселения	>5	555-1480 (<15-40 Ки/км <sup>2</sup> )	74-111 (<3 Ки/км <sup>2</sup> )	1,85-3,7 (<0,1 Ки/км <sup>2</sup> )
Первоочередно- го отселения	>5	>1480 (> 40 Ки/км <sup>2</sup> )	>111 (> 3 Ки/км <sup>2</sup> )	>3,7 (> 0,1 Ки/км <sup>2</sup> )
Эвакуации (от- чуждения)	территория вокруг ЧАЭС в радиусе 30 км, с которой в 1986 г. было эвакуировано население			

Перечень населенных пунктов, находящихся в зонах радиоактивного загрязнения, пересматривается не реже одного раза в пять лет Советом Министров Республики Беларусь.

Площадь зоны проживания с периодическим радиационным контролем составляет около 100 тыс. км<sup>2</sup>, зоны проживания с правом на отселение – около 21 тыс. км<sup>2</sup>, зоны отчуждения, первоочередного и последующего отселения занимают примерно 10 тыс. км<sup>2</sup>, из которых 7 тыс. км<sup>2</sup> расположены на территории Беларуси, 2 тыс. км<sup>2</sup> – России, 1 тыс. км<sup>2</sup> – Украины.

На территории с периодическим радиационным контролем проживание и трудовая деятельность не ограничиваются, но люди имеют особый социально-экономический с льготами и доплатами.

При *проживании населения на загрязнённой радионуклидами территории* учитывается, что:

- любая доза радиации не является безопасной для человека и требует принятия мер по её снижению;
- существует возможность суммации повреждающего действия на организм излучения и вредного действия ксенобиотиков;
- необходим индивидуальный подход к условиям проживания в каждом населённом пункте из-за сложившейся различной радиэкологической обстановки и психоэмоционального состояния людей.

На загрязнённых в результате радиационной аварии территориях должны осуществляться:

- радиационный контроль основных видов облучения населения;
- снижение доз по всем основным видам облучения до оптимальных значений (если доза облучения населения превышает 1,0 мЗв/год);
- мероприятия, не приводящие к нарушению хозяйственного и социального функционирования (если доза облучения превышает 0,1 мЗв/год, но не более 1,0 мЗв/год).

Облучение работников организаций, осуществляющих деятельность на подвергшихся загрязнению территориях, не должно превышать 5 мЗв/год. В организациях, где облучение работников выше 1 мЗв/год по причине аварийного загрязнения, создают службы радиационной безопасности, задачами которых являются радиационный контроль (согласованный с органами госсаннадзора) и проведение мероприятий по снижению облучения работников.

Дозовые нагрузки на проживающих на загрязнённых радионуклидами территориях людей снижают мероприятиями, проводимыми государством на *национальном уровне* и населением *самостоятельно*.

**На национальном уровне** проводятся следующие мероприятия:

- радиационный контроль;
- рациональное ведение сельского хозяйства;
- технологическая переработка сельскохозяйственного сырья;
- применение обогащённых пищевых продуктов;
- проведение обучения и воспитания населения.

**Радиационный контроль** осуществляется за мощностью экспозиционной дозы, плотностью потока частиц, содержанием радионуклидов в воздухе, воде, почве.

**Рациональное ведение сельского хозяйства** включает:

- выбор вида и сорта сельскохозяйственных растений;
- 
- определение типа, pH и механического состава почвы;
- измерение концентрации в почве минеральных и органических веществ.

Для снижения содержания радионуклидов в сельскохозяйственной продукции осуществляют:

- подбор культур;
- обработку почвы;
- известкование кислых почв;
- внесение минеральных удобрений;
- ведение животноводства.

Доступным способом снижения поступления радионуклидов из почвы в растения является *переспециализация растениеводства*, включающая замену культур и сортов с высокими коэффициентами перехода радиоактивных веществ на минимально накапливающие. Переспециализация особенно эффективна в овощеводстве. Достаточно результативно *изменение структуры посевных площадей*. Активная сорбция радионуклидов частицами почвы снижает их поступление в растения. Для ее улучшения рекомендуется вносить в почву глинистые минералы. Так как кислая реакция способствует более легкому переходу радионуклидов из почвы в растения, *известкование* почв применяется для повышения pH. Известкование снижает содержание радионуклидов в овощах в 5-10, во фруктах и ягодах – в 4-5 раз. *Внесение удобрений* обогащает почву минеральными веществами, кроме того фосфорные удобрения связывают  $^{90}\text{Sr}$ , калийные –  $^{137}\text{Cs}$  и препятствует накоплению радионуклидов в растениях. Однако количество азотных удобрений увеличивать не рекомендуется, так как их повышенное содержание в почве ускорит накопление радионуклидов растениями.

*Ведение животноводства* на загрязненных территориях также имеет свою специфику. В организм сельскохозяйственных животных радиоактивные вещества поступают перорально в основном в составе кормов. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в мягких органах и тканях животных в 2-3 раза выше, чем в костной ткани,  $^{90}\text{Sr}$  накапливается в скелете. Концентрация обоих радионуклидов во внутреннем жире и сале примерно в 20-30 раз ниже, чем в мясе.

С целью уменьшения содержания радиоактивных веществ в производстве мясомолочных продуктов:



- получают чистые корма путем рационального ведения растениеводства;
- окультуривают пастбища;
- вводят в корма ферроционаты и другие цезий-связывающие вещества.
- применяют особые схемы выращивания молодняка и откорма крупного рогатого скота, в частности, если радиоактивность территории выше  $5 \text{ Ки/км}^2$ , то за 1,5-2 месяца до убоя выпас скота организуют на «чистых» территориях, а если таковых нет, то скот переводят на стойловое содержание и кормят чистыми кормами с добавлением «берлинской глазури» или других сорбирующих добавок.

**Технологическая переработка сельскохозяйственного сырья** включает:

- переработку загрязненного цельного молока на сливки и творог, сыр и сливочное масло, топленое масло со снижением радионуклидов в 4-6, 8-10, 90-100 раз соответственно;
- переработку загрязненного радионуклидами мяса на консервы, фарш, колбасы.

Для снижения вредного влияния радиации на население пищевая промышленность производит хлебобулочные и кондитерские изделия, безалкогольные напитки и другие продукты питания с **добавками**, в частности:

- вытяжками из растений, содержащими масляный раствор  $\beta$ -каротина, экстракт корня солодки;
- витаминами  $B_1$ ,  $B_2$ ;
- фруктовыми соками и мякотью, богатыми микроэлементами, витаминами и пектиновыми веществами.

**Обучение и воспитание населения** включает информирование о снижении дозы облучения и способам защиты от радиации в конкретных условиях проживания на радиационно загрязненных территориях. Особое внимание уделяют беременным женщинам и кормящим матерям, от образа жизни которых зависит уровень облучения ребенка.

В условиях проживания на загрязненных радионуклидами территориях население **самостоятельно**:

- применяет доступные физические и биологические способы радиационной защиты;
- ведет здоровый образ жизни;
- осуществляет самоконтроль за своим здоровьем.

## Медицинская профилактика лучевых поражений

Основным условием сохранения жизни и здоровья людей при воздействии ионизирующего излучения является предупреждение предельно дозового облучения. Это осуществляется, в первую очередь, проведением комплекса организационных, инженерно- и агротехнических мероприятий, направленных на защиту временем, расстоянием и экранами. Медико-профилактические, включая санитарно-гигиенические, мероприятия применяются при невозможности избежать сверхдозового облучения.

В плане *медицинской профилактики* врачи:

- проводят диспансеризацию;
- участвуют в радиологическом обучении и воспитании;
- оценивают риск радиационного фактора для здоровья;
- дают рекомендации по здоровому образу жизни с упором на рациональное питание и превентивному питанию;
- назначают радиопротекторы, радиомитигаторы, адаптогены;
- направляют граждан для оздоровления на санаторно-курортное лечение.

*Диспансеризация* проводится в соответствии с Инструкцией «О порядке организации диспансерного обследования граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС, других радиационных аварий», утвержденной Постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь 16.03.2010 № 28, которая определяет порядок диспансерного обследования населения, пострадавшего от ионизирующего облучения, и их несовершеннолетних детей.

*Цель* диспансеризации – оказание медицинской помощи и освидетельствования пострадавших.

Диспансерное обследование проводится в государственных и ведомственных организациях здравоохранения. Общее руководство диспансеризацией осуществляется Министерством здравоохранения Республики Беларусь через Республиканский научно-практический центр радиационной медицины и экологии человека на республиканском уровне, управлениями здравоохранения областных исполнительных комитетов – на областном уровне, главными врачами организаций здравоохранения – на районном уровне.

Диспансерное обследование включает:

- выявление и постановка на учет граждан;
- организацию и проведение медицинских осмотров, диагностических, лечебных и реабилитационных мероприятий;
- внесение сведений о гражданах в базу данных Государственного регистра лиц, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС, других радиационных аварий;
- экспертную оценку диспансерного обследования граждан.

Выявление и постановка на учет граждан осуществляется участковым врачом-терапевтом, участковым врачом-педиатром, врачом общей практики, участковой медицинской сестрой и другими врачами-специалистами при обращении граждан в организации здравоохранения и при посещении на дому.

Диспансерное обследование граждан организуется по **шести группам первичного учета**:

- первая – участники ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС;
- вторая – граждане, эвакуированные, отселенные, самостоятельно выехавшие с территории радиоактивного загрязнения из зоны эвакуации в 1986 году;
- третья – граждане, проживающие на территории радиоактивного загрязнения в зонах первоочередного отселения и зоны последующего отселения, включая детей, находившихся во внутриутробном состоянии, а также отселенные и самостоятельно выехавшие из этих зон;
- четвертая – дети, родившиеся от граждан 1-3-й групп первичного учета;
- пятая – граждане, проживающие или проживавшие в зоне с правом на отселение, в зоне с периодическим радиационным контролем;
- шестая – участники ликвидации последствий других радиационных аварий и их дети.

Согласно Инструкции выделяются также группы **повышенного радиационного риска**:

- группа А – граждане, первой и второй групп, находившиеся в пределах зоны эвакуации в 1986 г.;
- группа Б – граждане третьей и пятой групп 1968-1986 гг. рождения;

– группа В – граждане с неоднократным в течение 2 и более лет превышением дозы внутреннего облучения 1 мЗв/год.

Диспансерное обследование граждан осуществляется по определенной схеме в объеме согласно законодательству Республики Беларусь (таблица 4.14). При наличии медицинских показаний гражданам могут быть назначены дополнительные диагностические исследования и консультации других врачей-специалистов.

**Таблица 4.14** – Схема диспансерного обследования граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС, других радиационных аварий

Группа первичного учета	Возрастная категория	Обязательный объем диспансерного обследования	
		Медицинский осмотр врачами-специалистами	Диагностические исследования
1	от 18 лет	Врач-терапевт (врач общей практики), врач-эндокринолог	Общий клинический анализ крови, ЭКГ, УЗИ щитовидной железы
2	от 18 лет	Врач-терапевт (врач общей практики), врач-эндокринолог	Общий клинический анализ крови, УЗИ щитовидной железы
3	до 18 лет	Врач-педиатр (врач общей практики), врач-эндокринолог	Общий клинический анализ крови, УЗИ щитовидной железы, СИЧ-измерения
	от 18 лет	Врач-терапевт (врач общей практики), врач-эндокринолог	Общий клинический анализ крови, УЗИ щитовидной железы, СИЧ-измерения
4	до 18 лет	Врач-педиатр (врач общей практики)	Общий клинический анализ крови
	от 18 лет	Врач-терапевт (врач общей практики)	Общий клинический анализ крови
5	до 18 лет	Врач-педиатр (врач общей практики)	Общий клинический анализ крови, СИЧ-измерения
	от 18 лет	Врач-терапевт (врач общей практики), врач-эндокринолог	Общий клинический анализ крови, УЗИ щитовидной железы, СИЧ-измерения
6	от 18 лет	Врач-терапевт (врач общей практики)	Общий клинический анализ крови

После проведенного медицинского осмотра пациенту устанавливается заключительный диагноз и разрабатывается индивидуальный план реабилитации, включающий проведение лечебных и реабилитационных мероприятий.

Экспертная оценка диспансерного обследования граждан включает:

- проверку полноты и правильности установления заключительного диагноза;
- проверку правильности кодирования диагнозов в соответствии с МКБ-10;
- проверку наличия и полноты информации о проведенных лечебных и реабилитационных мероприятиях;
- проверку соответствия объема и периодичности диспансерного наблюдения граждан.

Для проведения диспансерного обследования граждан могут создаваться *выездные бригады* из врачей-специалистов и средних медицинских работников.

***Обучение и воспитание населения в области обеспечения радиационной безопасности*** проводится в рамках гигиенического обучения и воспитания, направленного на овладение знаниями, умениями и навыками в области гигиены, здорового образа жизни, охраны здоровья и осуществляемого для профилактики заболеваний и формирования здорового образа жизни.

Под ***радиологическим обучением и воспитанием*** понимают комплексную просветительную, обучающую и собственно воспитательную деятельность, направленную на формирование здоровья индивидов, социальных групп и общества в целом и бережное отношение к среде обитания в условиях действия радиационного фактора. Его осуществляют *устными, печатными, изобразительными и комбинированными методами*.

***Устная пропаганда*** позволяет напрямую контактировать с аудиторией с учетом ее специфики и воздействует на слуховой анализатор. К средствам устной пропаганды относятся лекции, беседы, вечера вопросов и ответов, викторины, конференции, инструктажи.

***Печатные методы*** направлены на массовый охват населения с помощью тиражированной литературы. В печатной пропаганде применяются книги, брошюры, журналы, статьи, листовки, памятки, газеты, рецепты, электронные информаторы.

***Метод изобразительной пропаганды*** является наглядным и воздействует на зрительный анализатор. Изобразительная пропаганда

проводится с помощью рисунков, таблиц, плакатов, планов, фотографий, муляжей, моделей, фантомов, скульптур, микро- и макропрепаратов.

**Комбинированная пропаганда** оказывает влияние на зрительный и слуховой анализаторы аудитории одновременно, позволяет воздействовать большое количество людей и является высоко эффективной. Комбинированная пропаганда включает кино, телевидение, видеопоказы, музеи, выставки, дни здоровья.

При проведении радиологического обучения и воспитания обращается внимание на физический, химический и биологический способы защиты, принципы радиационной защиты «количеством», «расстоянием», «временем» и «экранами». Большое значение в выработке привычек и навыков имеет обучение населения способам радиационной защиты на личном примере. Особую роль играет борьба со стрессовыми ситуациями и радиофобией, которые ухудшают последствия ионизирующего облучения. В этом случае привлекаются врачи-психиатры, используются методы психопрофилактики и психогигиены по сохранению и укреплению психического здоровья населения, живущего на радиоактивно загрязненных территориях.

Под *риском* понимается вероятность повреждения, болезни или смерти при определенных условиях, обусловленных воздействием вредных факторов среды обитания. С точки зрения радиационной медицины **риск** для здоровья – это *вероятность появления лучевых детерминированных и стохастических поражений у человека за определенный интервал времени*.

**Абсолютный риск** – это увеличение количества случаев лучевых поражений в определенной группе населения, не зависящее от действия других факторов.

**Целью** определения риска для здоровья является диагностирование случаев лучевых поражений при обращении населения за медицинской помощью или во время медицинских осмотров.

Для определения вероятности возникновения лучевых поражений проводится оценка риска. Для наиболее полной оценки вреда, который может быть нанесен здоровью в результате облучения в малых дозах, определяется ущерб, учитывающий эффекты облучения отдельных органов и тканей тела человека с различной радиочувствительностью и всего организма в целом.

В соответствии с линейной беспороговой теорией зависимости риска стохастических эффектов от дозы облучения величина риска

пропорциональна дозе облучения и связана с дозой через линейные коэффициенты радиационного риска.

Величина, используемая для определения границ доз облучения

персонала и населения, равна  $5,0 \times 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$  и называется обобщенный граничный риск. При работе с источниками ионизирующей радиации вводятся следующие границы доз облучения (в течение года):  $1,0 \times 10^{-3} \text{ Зв}^{-1}$  для персонала и  $5,0 \times 10^{-5} \text{ Зв}^{-1}$  для населения. Область оптимизации риска и область абсолютно приемлемого риска разделяются значением уровня пренебрежимо малого риска, равным  $10^{-6}$ . При обосновании защиты от источников потенциального облучения в течение года вводятся значения граничного риска для персонала –  $2,0 \times 10^{-4} \text{ год}^{-1}$ , для населения –  $1,0 \times 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ .

Уменьшение риска до возможно низкого уровня осуществляется с учетом того, что:

- граница риска устанавливается индивидуально для каждого источника ионизирующей радиации (так как предел риска регламентирует потенциальное облучение от всех возможных источников);

- снижение риска ниже минимального уровня нецелесообразно (так как ниже этого значения риск считается пренебрежимым).

Коэффициенты номинального риска (вероятности нанесения вреда здоровью при нормальном функционировании радиационно-опасного объекта) с учетом вреда рака и наследственных заболеваний приведены в таблице 4.15.

**Таблица 4.15** – Коэффициенты номинального риска с учетом вреда злокачественных новообразований и наследственных заболеваний

Облучаемая группа населения	Коэффициент риска злокачественных новообразований, $\times 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$	Коэффициент риска наследственных эффектов, $\times 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$	Сумма, $\times 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$
Все население	5,5	0,2	5,7
Персонал	4,1	0,1	4,2

С учетом уровня безопасности АЭС в режиме нормальной эксплуатации, когда фактические выбросы и сбросы создают по каждому пути воздействия дозу облучения населения менее  $10 \text{ мкЗв}$  в год, радиационный риск для населения составляет менее  $10^{-6}$  за год и является безусловно приемлемым.

Риск развития онкологических заболеваний со смертельным исходом у населения в районе размещения АЭС не должен превышать 0,1 % суммы рисков развития раков со смертельным исходом, возникающих в результате других причин.

Под **здоровым образом жизни** понимается осознанная необходимость постоянного выполнения правил и способов сохранения и укрепления здоровья, сочетающаяся с разумным отношением к окружающей среде. **Рациональное питание** – это физиологически полноценное питание здоровых людей, которое соответствует энергетическим, пластическим и биохимическим потребностям организма, обеспечивает гомеостаз и поддерживает функциональную активность органов и систем, сопротивляемость к воздействию неблагоприятных факторов окружающей среды на оптимальном уровне в различных условиях его жизнедеятельности. Рациональное питание должно быть адекватным, сбалансированным, безопасным и разнообразным.

**Превентивное питание**, рекомендуемое населению, направлено на:

- снижение поступления радионуклидов;
- снижение скорости всасывания радионуклидов в организме;
- ослабление вредного действия радионуклидов на клетки, ткани и органы;
- уменьшение депонирования и ускорения выведения радионуклидов из организма.

Для **снижения поступления радионуклидов** предусматривается ограничение или исключение потребления грибов, ягод, овощей и других продуктов:

- являющихся накопителями радионуклидов;
- загрязненных радионуклидами;
- загрязненных нитратами, свинцом, ртутью, кадмием, алюминием усиливающими действие радиации на организм человека;
- богатых жирами, которые являются основой для перекисного окисления липидов, участвуют в образовании радиотоксинов, служат проводниками в организм и накопителями гидрофобных ксенобиотиков.



Рекомендуется потребление экологически чистых продуктов, проверенных:

- Госсанэпиднадзором;
- Госсанветнадзором;
- Госинспекцией по качеству.

Все продовольствие, реализуемое предприятиями торговли и общественного питания, должно соответствовать требованиям качества и иметь сертификаты качества производителя, санитарно-эпидемиологическое заключение и сертификат соответствия на каждую партию продуктов.

**Снижению поступления радионуклидов** также способствует кулинарная и технологическая обработка пищевых продуктов. При производстве качественных продуктов особое внимание уделяется качеству сырья, технологиям обработки, а также планировке, отделке, оборудованию, санитарно-техническому благоустройству и содержанию помещений предприятий пищевой промышленности и общественного питания.

Технологическая переработка продовольственного сырья может снижать остаточные количества радионуклидов до РДУ. Так, при засолке и мариновании количество радионуклидов в получаемой продукции будет в два раза меньшим по сравнению с исходными свежими продуктами. При переработке молока радионуклиды переходят в молочные продукты обратно пропорционально их жирности. Их наименьшая концентрация регистрируется в сливочном масле, сливках, сырах, жирном твороге, сметане.

Количество радионуклидов, в частности, цезия-137, в мясе значительно снижается путем дезактивации. Так, промывка в проточной воде уменьшает радиоактивное загрязнение в 1,5-3 раза, вымачивание в 85 % растворе поваренной соли в течение 2 ч – в 3 раза. При четырехразовой засолке и вымачивании солонины со сменой рассола радиоактивность может быть уменьшена в 100 раз. При этом выход радионуклидов из мяса пропорционален степени измельчения мяса и времени его вымачивания.

Следует отметить, что из молодого мяса радиоактивные вещества уходят значительно быстрее, чем из старого.

Предпочтительным способом термической обработки продуктов, полученных на загрязненных территориях, является варка, при которой значительная часть радионуклидов переходит в бульон.

При проварке мяса в течение 10 мин в слегка кипящей воде при закрытой крышке и сливе отвара содержание радионуклидов умень-

шается примерно в 2 раза, а после варки в других порциях воды в течение 30-40 минут – в 3-6 раз.

Кости говядины, содержащие стронций-90, для приготовления бульонов использовать не рекомендуется.

После проварки мяса его можно подвергать тушению, жарке, запеканию или другому способу тепловой обработки. Однако первичные жарка, тушение, высушивание, копчение, вяление загрязненной продукции нецелесообразны, так как с испарением жидкости концентрация радионуклидов увеличивается.

Для дезактивации *овощей и фруктов* вначале производят механическую очистку их поверхности от земли и удаление наиболее загрязненных частей, затем промывку в теплой проточной воде. Более полная дезактивация овощей происходит после варки.

Дезактивация *воды для питья* осуществляется путем удаления радиоактивных частиц и растворенных радионуклидов. Для *очистки от радиоактивных частиц* проводится самопроизвольное оседание, вынужденное оседание, фильтрация, в том числе через сорбенты, *от растворенных радионуклидов* – фильтрация, выпаривание, ионообменная адсорбция, мембранные технологии.

Для *снижения всасывания и связывания радионуклидов в желудочно-кишечном тракте* применяют продукты, богатые пектинами, фитатами, антоцианами, пищевыми волокнами, лигнинами. Источниками поступления *пектинов* являются груша, свекла, черная смородина, морковь, яблоки, огурцы, мармелад, перец, зефир, тыква, соки с мякотью, крыжовник, клюква, черешня, *фитатов* – зерновые, бобовые. Много *антоцианов* содержат темноокрашенные плоды и ягоды (черноплодная рябина, слива, черная смородина, виноград, вишня), *пищевых волокон* – цельное зерно, овощи, орехи, семена, бобовые.

Для предотвращения внутреннего облучения радионуклидами цезия, стронция и плутония применяется *конкурентное замещение* их калием, рубидием, кальцием и железом потребляемых продуктов. Источниками *калия* являются курага, урюк, изюм, чернослив, чай, орехи, лимон, фасоль, картофель, пшеница, рожь, редька, овсяная крупа, яблоки, хурма, черешня, томаты, капуста, чеснок, морковь, черная смородина, свекла, абрикосы, молочные продукты, какао, пивные дрожжи. Содержат калий и продукты животного происхождения – свинина, икра, сливочное масло, а также продукты моря.

Много *рубидия* содержится в красном винограде, кальция – молоке и молочных продуктах, яйцах, бобовых, зеленом луке, укропе,

петрушке, репе, хрене, шпинате, *железа* – мясе, рыбе, зеленых овощах, ржаном хлебе, семенах подсолнечника, яблоках, изюме, салате, черноплодной рябине. Лучше усваивается железо животного происхождения.

***Для предотвращения действия радионуклидов на биологические молекулы:***

- исключаются из рациона продукты, богатые жирами (масло сливочное, сало) и прооксидантами (ревень, красная смородина);

- рекомендуются животные продукты, содержащие полноценный белок (мясо, рыба, птица).

- рекомендуется прием пищи, содержащей витамины (С, Е, А, бета-каротины) и минералы (йод, цинк, медь, селен, кобальт), с антиоксидантными свойствами, которые препятствуют перекисному окислению липидов.

Витамин *С* содержит шиповник, черная смородина, сладкий перец, черноплодная рябина, земляника, томаты, капуста, зеленый лук, витамин *Е* – облепиха, кукуруза, бобовые, нерафинированные растительные масла, гречка, семечки подсолнуха, семена злаковых, витамин *А* – говяжья печень, сливочное масло, яичный желток, *бета-каротины* – морковь, красный сладкий перец, абрикосы, брокколи, шпинат.

Основными источниками поступления *йода* являются морская капуста, морские продукты, рыба, фасоль, гречневая крупа, чеснок, свекла, черноплодная рябина, йодированная соль, *цинка* – кукуруза, грецкие орехи, овсяная крупа, рис, фасоль, семена подсолнечника и тыквы, цветная капуста, свекла, морковь, желток яйца, печень, говядина, сельдь, *меди* – свекла, картофель, яблоки, горох, фасоль, орехи, гречка, сыр, печень, рыба, мясо, *селена* – чеснок, рис, ячмень, овес, рыба, *кобальта* – щавель, груша, укроп, свекла, зеленый лук, черная смородина, рыба, морковь, орехи, горох, фасоль.

***Для ускорения выведения радионуклидов*** из организма рекомендуется:

- усиление перистальтики и регулярное опорожнение кишечника за счет включения в пищевой рацион продуктов, богатых пищевыми волокнами и клетчаткой (хлеб грубого помола, пшено, гречневая, перловая и овсяная крупы, капуста, свекла, чернослив, отвар семян льна, крапивы, ревеня);

- регулярный пассаж желчи и мочи дополнительным количеством жидкостей и настоев трав с мочегонным и желчегонным действием (настои белой ромашки, зверобоя, бессмертника, тысячелистника, мяты, шиповника, укропа, тмина, зеленого чая);

– стимуляция лимфатического дренажа лекарственными травами (овес обыкновенный, овсяные хлопья, листья черной смородины, подорожника, цветки календулы, кукурузные рыльца);

– потребление зеленых овощей, содержащих соли кальция и калия, которые способствуют выведению из организма цезия-137 и стронция-90.

*Выведению радионуклидов* также способствует:

– голодание;  
– периодическая очистка органов и систем от шлаков и токсинов, вместе с которыми выводятся радионуклиды.

Для **повышения адаптационно-компенсаторных возможностей организма** врачи назначают фитопрепараты из лекарственных растений, обладающих:

- *стимулирующим и адаптогенным* (женьшень, элеутерококк, аралия, родиола) действием;

- *кардиотропным* (боярышник, пустырник, зверобой) действием;

- *противолучевым* (облепиха, подорожник, ромашка аптечная, женьшень, золотой корень, заманиха, медуница лекарственная, одуванчик) действием;

- *противомикробным* (зверобой, ромашка, календула, шалфей, подорожник) действием.

Также используют фитопрепараты из шиповника, черной смородины, облепихи, рябины, черники, календулы, крапивы, содержащие *витамины, в том числе с антиоксидантными свойствами*.

Повышению адаптационно-компенсаторных возможностей организма способствуют лекарственные средства промышленного производства:

- настойка женьшеня;
- настойка элеутерококка;
- настойка заманихи и другие.

Также рекомендуется:

- психотерапия, психопрофилактика и психогигиена;  
- прием витаминominеральных и витаминoаминокислотных комплексов;

– гидро-, свето-, электро-, тепло-, грязе-, механо- и другие физиотерапевтические процедуры;

– прием профилактических продуктов, обогащенных пищевыми волокнами, витаминами, минеральными веществами, животным белком.

К *медицинским профилактическим средствам противорадиационной защиты*, назначаемым врачами, относятся:

- радиопротекторы;
- средства длительного поддержания повышенной радиорезистентности организма;
- средства предупреждения поражений от внутреннего облучения инкорпорированных радионуклидов.

**Радиопротекторы** – химические соединения, назначаемые для предупреждения или ослабления вредного влияния ионизирующих излучений на организм до облучения.

*Защитное действие радиопротекторов* реализуется в физико-химической и химической стадиях. Механизм действия радиопротекторов заключается в:

- инаktivировании свободных радикалов;
- донорстве электронов;
- адсорбции на клеточных макромолекулах и препятствии их повреждения;
- восстановлении поврежденных радиацией молекул;
- создании клеточной гипоксии;
- препятствии развитию кислородного эффекта;
- развитию биохимического шока;
- повышении в клетках содержания сульфгидрильных групп.

Наиболее важное их действие заключается в предупреждении разрушения и стимуляции процессов восстановления ДНК.

*Показателями эффективности радиопротекторов* являются:

- ✓ коэффициент защиты – процент выживших облученных животных при введении радиопротектора;
- ✓ фактор изменения дозы – увеличение среднесмертельной дозы СД<sub>50</sub> облученных животных при введении радиопротектора;
- ✓ скорость развития противолучевого эффекта – время между введением радиопротектора и развитием радиорезистентности;
- ✓ продолжительность радиозащитного действия – время до развития лучевого поражения.

Радиопротектор как средство профилактики должен:

- при остром облучении в дозах 1-10 Гр иметь фактор изменения дозы не менее 1,2;
- быть нетоксичным, не иметь побочных эффектов;
- иметь продолжительность эффекта 2-8 ч при пероральном приеме;
- защищать от разных видов ионизирующих излучений;

- не снижать резистентность организма к другим вредным воздействиям внешней и внутренней среды;
- быть стабильным, не терять своих защитных свойств в течение 3 месяцев;
- иметь низкую стоимость, быть доступным.

Радиопротекторы классифицируют по:

- химической структуре;
- тропности к органам и тканям;
- механизму действия;
- скорости развития эффекта;
- длительности защитного эффекта (таблица 4.16).

К наиболее эффективным радиопротекторам относят *цистамин*, *индралин*, *мексамин*, *амифостин*, *нафтизин*.

**Цистамин** принимается внутрь за 30-60 мин до гамма- и рентгеновского облучения, продолжительность защитного действия 4-6 ч, **индралин** – per os за 10-15 мин до облучения, продолжительность защитного действия 30-60 мин, **мексамин** – per os за 5-15 мин до облучения, продолжительность защитного действия 60 мин, **амифостин** – внутривенно за 30 минут до облучения, продолжительность защитного действия 1 сутки, **нафтизин** – внутримышечно за 3-5 мин до облучения, продолжительность защитного действия 1,5-2 ч.

**Таблица 4.16**– Классификация радиопротекторов

Признак	Группа	Представители
Химическая структура	- сероазотсодержащие - биогенные амины - другие соединения	цистамин, мексамин, амифостин; индралин, нафтизин, препарат С; цианиды, нитриты, депрессанты
Механизм действия	- конкурентное - рецепторное - нерецепторное гипоксическое	цистамин; индралин; цианиды, нитриты.
Длительность эффекта	- кратковременное - длительное	цистамин, индралин; индометарфен, диэтилстильбестрол

К *средствам предупреждения поражений от внутреннего облучения инкорпорированными радионуклидами* относятся:

- средства, предупреждающие поступление радионуклидов через кожу и слизистые;

- средства, предупреждающие депонирование радионуклидов в критических органах;
- средства, ускоряющие элиминацию радионуклидов из организма.

***Средства, предупреждающие поступление радионуклидов через кожу и слизистые***, включают мыла, синтетические моющие средства, ионообменные смолы, натрия гидрокарбонат, физиологический раствор.

К *предупреждающим депонирование радионуклидов* в критических органах относятся средства, предотвращающие накопление радиоактивного йода в щитовидной железе – калия йодид, настойка йода, раствор Люголя, радиоактивного цезия и рубидия в желудочно-кишечном тракте, мышцах и других органах – ферроцин, радиоактивного стронция и бария в костях – полисурьмин, адсорбар, фосфалюгель.

К наиболее эффективным средствам, *ускоряющим элиминацию* из организма радиоактивного *плутония* и продуктов деления *урана* относятся пентацин, тримефацин, *полония* – унитиол, оксатиол, *цезия* – калия оротат, ферроцин, *стронция* – кальция хлорид, кальция глюконат, аммония хлорид, бария сульфат, алюминия фосфат.

К ***средствам длительного поддержания повышенной радиорезистентности организма*** относятся средства защиты от:

- вызывающих детерминированные эффекты доз ионизирующего излучения;
- от субклинических доз ионизирующего излучения.

*Средства защиты от вызывающих детерминированные эффекты доз ионизирующего излучения* включают гормональные средства стероидной структуры и их аналоги (диэтилстильбэстрол, индометарфен) и иммуномодуляторы (вакцины, цитокины, пептиды, нуклеотиды, ингибиторы простагландин, продукты метаболизма микроорганизмов и другие).

К *средствам защиты от субклинических доз ионизирующего излучения* относятся корректоры тканевого метаболизма (предшественники нуклеиновых кислот, компоненты антиоксидантной защиты, витамины, минералы, аминокислоты), фитоадаптогены (экстракт элеутерококка, настойка женьшеня), зооадаптогены (продукты пчеловодства, продукты гидробионтов).

Радиопротекторным действием обладают также некоторые *антибиотики*, увеличивающие сопротивляемость организма к бактериям и восстанавливающие пептидные связи, а также *фенольные соеди-*

нения полимерной структуры, в частности меланин. Радиопротекторные свойства отмечены у ряда *радиомитигаторов* – химических соединений, которые при введении в организм в ранние сроки после облучения до наступления клинических признаков лучевого поражения снижают повреждающее действие ионизирующих излучений на клетки критических систем организма, в первую очередь, кроветворной и иммунной систем. Эффективны в первое время после облучения и до облучения средства профилактики и купирования первичной реакции на облучение – противорвотные (латран, церукал) и противодиарейные (метацин, лоперамид), средства ранней патогенетической терапии (иммуномодуляторы, стимуляторы регенерации, плазмозаменители).

К радиомитигаторам относят и указанные выше *средства длительного поддержания повышенной радиорезистентности организма*, применяемые до облучения и показывающие защитный эффект после облучения.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Правовое регулирование и обеспечение радиационной безопасности.
2. Надзор и контроль за обеспечением радиационной безопасности. Радиационный мониторинг.
3. Радиационная безопасность в условиях планируемого облучения.
4. Радиационная безопасность в ситуации аварийного облучения.
5. Радиационная безопасность в условиях существующего облучения.
6. Медицинская профилактика лучевых поражений.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский, В.И. Радиационная гигиена. Практикум: учеб. пособие / В.И. Архангельский, В.Ф. Кириллов, И.П. Коренков. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2009. – 352 с.
2. Галицкий, Э.А. Радиобиология: учеб. пособие / Э.А. Галицкий, В.К. Пестис, И.М. Багель. – Гродно, 2003. – 135 с.
3. Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований: сан. правила и нормы 2.6.1.8-38-2003, утв. пост. Глав. гос. сан. врача Респ. Беларусь 26.05.2008. – Минск: ГУ «РЦГЭ и ОЗ» МЗ РБ, 2003. – 20 с.
4. Гигиенические требования к проектированию и эксплуатации атомных электростанций: сан. нормы, правила и гигиенические нормативы, утв. пост. мин-ва здр-я РБ 31.03.2010 г., № 39. – Минск: ГУ «РЦГЭ и ОЗ» МЗ РБ, 2010. – 60 с.
5. Закон Республики Беларусь «Об использовании атомной энергии» № 426-З от 30 июля 2008 г. // Нац. реестр правовых актов Республики Беларусь, 2008 г., № 63, 2/1947. – 21 с.
6. Закон Республики Беларусь «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС» № 385-З от 26 мая 2012 г. // Нац. реестр правовых актов Республики Беларусь, 2012 г., № 63, 2/1937. – 18 с.
7. Закон Республики Беларусь «О радиационной безопасности населения» №122-З от 05.01.1998 г. в ред. Закона Респ. Беларусь 21.12.2005 г., № 72-З // Нац. реестр правовых актов Республики Беларусь, 2006 г., № 2, 2/1169. – 15 с.
8. О санитарно-эпидемическом благополучии населения Республики Беларусь: Закон Респ. Беларусь, 7 янв. 2012 г., № 340-З // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – Минск, 2006. – № 8. – 2/1892. – 21 с.
9. Закон Республики Беларусь «О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС» № 328-З от 22 декабря 2011 г. // Нац. реестр правовых актов Республики Беларусь, 2012 г., № 2, 2/1880. – 24 с.
10. Закон Республики Беларусь «Об охране окружающей среды» №1982-ХН от 26.11.1992 г. в ред. Закона № 367-З от 08.07.2008г. // Нац. реестр правовых актов Республики Беларусь, 2008г., № 170, 2/1464. – 50 с.

11. Клиника, диагностика, лечение и профилактика энтеробиоза у детей, проживающих на радиационно загрязненных территориях: мет. рекоменд., утв. Мин-вом здр-я БССР 09.12.1991. – Витебск, 1991. – 15 с.
12. Конституция Республики Беларусь 1994 года (с изменениями и дополнениями, принятыми на республиканских референдумах 24 ноября 1996 г. и 17 октября 2004 г.). – Минск: Амалфея, 2005. – 31 с.
13. Матвеевко, В.Н. Радиационная медицина: учеб. пособие / В.Н. Матвеевко. – Витебск, 2009. – 304 с.
14. Радиационная медицина: учеб. пособие / А.Н. Стожаров [и др.]; под общ. ред. проф. А.Н. Стожарова. – Мн.: МГМИ, 2000. – 154 с.
15. Радиационная медицина: учеб. пособие / В.Н. Бортновский [и др.]; под ред. В.Н. Бортновского. – Гомель: ГомГМУ, 2016. – 213 с.
16. Радиационная медицина. Том 1. Теоретические основы радиационной медицины / М.В. Васин [и др.]; под ред. Л.А. Ильина. – М: Изд. АТ, Государственный научный центр Институт биофизики, 2004. – 991 с.
17. Радиационная медицина. Том 2. Радиационные поражения человека / М.В. Васин [и др.]; под ред. Л.А. Ильина. – М: Изд. АТ, Государственный научный центр Институт биофизики, 2001. – 432 с.
18. Радиационная медицина. Том 3. Радиационная гигиена / М.В. Васин [и др.]; под ред. Л.А. Ильина. – М: Изд. АТ, Государственный научный центр Институт биофизики, 2002. – 608 с.
19. Радиационная медицина: учеб. пособие / А.Н. Гребенюк [и др.]; под ред. С.С. Алексанина, А.Н. Гребенюка. – СПб: Политехника-сервис, 2013. – Ч. 2: Клиника, профилактика и лечение радиационных поражений. – 156 с.
20. Радиационная медицина: учеб. пособие / А.Н. Гребенюк [и др.]; под ред. С.С. Алексанина, А.Н. Гребенюка. – СПб: Политехника-сервис, 2013. – Ч. 1: Основы биологического действия радиации. – 124 с.
21. Радиационная медицина: учеб. пособие / А.Н. Гребенюк [и др.]; под ред. С.С. Алексанина, А.Н. Гребенюка. – СПб: Политехника-сервис, 2013. – Ч. 3: Основы обеспечения радиационной безопасности. – 151 с.
22. Радиационная медицина: учеб. пособие / А.Н. Стожаров [и др.]; под общ. ред. проф. А.Н. Стожарова. – Мн.: МГМИ, 2000. – 154 с.
23. Радиационная медицина: учеб.-метод. пособие / А.Н. Стожаров [и др.]; под общ. ред. проф. А.Н. Стожарова. – Мн: ИВЦ Минфина, 2010. – 208 с.
24. Радиационная и экологическая медицина: учеб. пособие / А.Н. Стожаров [и др.]; под. ред. А.Н. Стожарова. – Мн.: РИВШ, 2015. – 158 с.

25. Радиобиология, радиационная физиология и медицина: словарь-справочник / В.И. Легеза, И.Б. Ушаков, А.Н. Гребенюк, А.Е. Антушевич. – 3-е изд., испр. и доп. – СПб: Фолиант, 2017. – 176 с.

26. Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в пищевых продуктах и питьевой воде (РДУ-99). ГН 10-118-99 // Нац. реестр правовых актов Республики Беларусь, 1999 г., №16. – 6 с.

27. Старовойтов, И.Г. Об аттестации рабочих мест с источниками ионизирующих излучений в учреждениях здравоохранения / И.Г. Старовойтов // Медицинский вестник. – 2014. – №7. – С. 10-11.

28. Требования к обеспечению радиационной безопасности персонала и населения при обращении с радиоактивными отходами: сан. нормы и правила, утв. пост. М-ва здравоохран. Респ. Беларусь 31.12.2015 г., № 142. – Минск: ГУ «РЦГЭ и ОЗ» МЗ РБ, 2015. – 51 с.

29. Требования к обеспечению радиационной безопасности персонала и населения при осуществлении деятельности по использованию атомной энергии и источников ионизирующего излучения: сан. правила и нормы, утв. пост. М-ва здравоохран. Респ. Беларусь 31.12.2013 г., № 137. – Минск: ГУ «РЦГЭ и ОЗ» МЗ РБ, 2013. – 51 с.

30. Требования к радиационной безопасности и Гигиенический норматив «Критерии оценки радиационного воздействия»: сан. правила и нормы № 213, утв. пост. М-ва здравоохран. Респ. Беларусь 28.12.2012. – Минск: ГУ «РЦГЭ и ОЗ» МЗ РБ, 2013. – 68 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

	<b>Стр.</b>
<b>Предисловие</b>	3
<b>Глава 1. Введение в радиационную медицину</b>	4
Излучения и их значение	4
Происхождение ионизирующих излучений	6
Радиационная медицина, цель, задачи, методы, дифференциация, взаимосвязь с другими науками	12
Краткая история развития радиационной медицины	15
Значение радиационной медицины для врача лечебного профиля	20
Характеристика лучевых поражений	22
<b>Глава 2. Этиология лучевой болезни</b>	28
Ионизирующие излучения, их свойства	28
Дозы ионизирующих излучений	36
Дозиметрия и радиометрия	40
Источники ионизирующих излучений	48
Авария на ЧАЭС как источник ионизирующего излучения	70
Радиационный фон Земли, его составляющие	79
<b>Глава 3. Патогенез лучевых поражений. Лучевая болезнь</b>	82
Стадии развития лучевых поражений	82
Лучевые поражения клеток, тканей, органов и систем организма	91
Лучевые поражения организма человека в эмбриональный и постэмбриональный периоды	97
Пути воздействия ионизирующих излучений на человека	104
Характеристика острой и хронической лучевой болезни	107
Характеристика локальных лучевых поражений	119
Особенности лучевых поражений при внутреннем облучении организма	127

Сочетанные и комбинированные радиационные поражения	141
<b>Глава 4. Радиационная безопасность. Профилактика лучевых поражений</b>	145
Правовое регулирование и обеспечение радиационной безопасности	145
Надзор и контроль за обеспечением радиационной безопасности. Радиационный мониторинг	153
Радиационная безопасность в условиях планируемого облучения	156
Радиационная безопасность в ситуации аварийного облучения	166
Радиационная безопасность в условиях существующего облучения	180
Медицинская профилактика лучевых поражений	187
<b>Список литературы</b>	202

Учебное издание  
**Бурак Иван Иванович**  
**Черкасова Олеся Алексеевна**  
**Григорьева Светлана Викторовна**  
**и др.**

## **РАДИАЦИОННАЯ МЕДИЦИНА**

**пособие**

**часть 1**

Редактор И.И.Бурак  
Технический редактор И.А.Борисов  
Компьютерная верстка С.В. Григорьева  
Корректор Н.И. Миклис

Подписано в печать \_\_\_\_\_ Формат бумаги 64х84 1/16.  
Бумага типографская №2. Гарнитура \_\_\_\_\_ Усл. печ.л. \_\_\_\_\_  
Уч. – изд. л. \_\_\_\_\_ Тираж \_\_\_\_\_ Заказ № \_\_\_\_\_  
Издатель и полиграфическое исполнение УО «Витебский государственный  
медицинский университет»  
ЛП № 02330/453 от 30.12.2013  
пр. Фрунзе, 27, 210023, Витебск